

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

КРАВЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ 

УДК 628.16:579.63+628.4:579.63

**БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОРЕСУРСООФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ПРОЦЕСІВ НА ОБ'ЄКТАХ КОМУНАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

03.00.20 – біотехнологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України (м. Київ) та Підрозділі житлово-комунального господарства ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» (м. Київ).

**Науковий
консультант:**

доктор хімічних наук, професор

Кузьмінський Євгеній Васильович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
в.о. завідувача кафедри екобіотехнології і біоенергетики.

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Циганков Сергій Петрович

ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу біотехнології поновлюваної сировини та альтернативних палив;

доктор технічних наук, професор

Хоружий Петро Данилович

Інститут водних проблем і меліорації НААН України, головний науковий співробітник лабораторії водопостачання та водовідведення;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Карпенко Олена Володимирівна

Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, завідувач відділу хімії та біотехнології горючих копалин.

Захист відбудеться *01 березня 2019 року о 10-30 годині* на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 4, ауд. 258.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано 29 січня 2019 року.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28,
д-р біол. наук, доц.

О.Ю. Галкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення санітарно-епідеміологічного благополуччя населення належить до одного з ключових завдань держави і потребує, насамперед, надійного рівня функціонування систем централізованого водопостачання, водовідведення та поводження з побутовими відходами. Це можливо лише шляхом розроблення нових та адаптації відомих методів і технологій, серед яких найбільш перспективними є маловитратні біотехнологічні методи очищення води та утилізації відходів.

У теперішній час застосування біотехнологій у комунальному господарстві країни є досить обмеженим: процеси на їх основі реалізовані лише при очищенні стічних вод. Для інших процесів, таких як знезалізнення, деманганація, деамонізація або розклад органічних речовин на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ), роль мікроорганізмів-деструкторів добре відома, але біотехнологічні прийоми інтенсифікації практично не застосовуються. Проте наявний практичний досвід (Седлухо Ю.П., 2016, Менча М.М., 2004, Журба М.Г., 2006 та ін.) свідчить, що саме використання біотехнологій, особливо реалізованих в умовах природного формування біоценозів, є економічно доцільним. Впровадження біологічних методів, окрім забезпечення матеріало- і ресурсозбереження, практично виключає негативний вплив на довкілля, оскільки у в якості біологічних агентів переважно використовуються природні мікроценози.

Підземні води з підвищеним вмістом заліза і мангану (стосовно нормативних вимог) широко залучені до систем централізованого водопостачання майже по всій території України. Відомі чисельні як хімічні, так і біологічні методи знезалізнення і деманганації води (Золотова Є.Ф. та ін., 1975; Ніколадзе Г.І, 1978; Degremont, 2007), які різняться за ступенем технологічної надійності, економічності, простоти експлуатації тощо. Зазвичай ці технології передбачають окиснення сполук заліза і мангану з подальшим відділенням утвореного осаду на фільтрах. Як окисники найчастіше використовуються кисень, озон, хлоровмісні сполуки, а для завантаження фільтрів - кварцовий пісок, цеоліт, керамзит тощо (Тарасевич Ю.І. та ін., 2013; Farkas, A., 2013). Проте процеси, які перебігають під час вилучення заліза і мангану, досі залишаються недостатньо вивченими.

Невирішеною є й проблема деамонізації води, оскільки сполуки амонію потрапляють у воду внаслідок метаболічних процесів, сільськогосподарської та тваринницької діяльності, а також дезінфекції із застосуванням хлорамонізації. Згідно з Керівництвом ВООЗ із забезпечення якості питної (IV видання, 2017) аміак, хоча безпосередньо не впливає на здоров'я людини і його санітарна нормативна величина не розраховується, може знижувати ефективність дезінфекції питної води, призводити до утворення нітритів, неприємних запахів, а також сприяти росту водних мікроорганізмів. З існуючих методів видалення амонійного азоту (Запольський А.К., 2005; Мальований М.С., 2011, Mark Lichtwardt, 2011, Konrád Lájer, 2012) найприйнятнішою є біологічна нітрифікація. Але ця технологія реалізується у спеціальних спорудах -

біореакторах, що суттєво звужує можливість її застосування в умовах водоочисних станцій.

У переважній більшості населених пунктів країни ТПВ складаються на полігонах, а в невеликих населених пунктах - навіть на стихійних звалищах. За оцінками експертів в країні щороку 10 млн тон ТПВ додатково розміщується на понад 5500 полігонах (Мальований М., Муха О., Сатін І. та ін. 2017).

Важлива роль біологічних процесів при поводженні з ТПВ відома давно (Мирний А., 1990; Щепетова В., 2005; Касимов О., 2013), однак їх інтенсифікація ускладняється через специфічність морфологічного складу для кожного конкретного полігону. За таких умов пошук уніфікованих параметрів або характеристик, методів прогнозування і моделювання біологічних процесів є першим кроком у напрямку застосування біотехнологічних методів для рекультивації існуючих полігонів ТПВ.

Таким чином, створення нових енергоресурсоефективних, технологічно доступних, економічно обґрунтованих та екологічно безпечних біотехнологій для інтенсифікації процесів підготовки питної води і біодеструкції органічних речовин на полігонах ТПВ є актуальною проблемою, на розв'язання якої спрямована дана дисертаційна робота. Результати, отримані при її виконанні дозволять оцінити біотехнологічний потенціал досліджених мікроорганізмів та перспективи їх практичного застосування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках науково-дослідних робіт державного значення: кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» «Використання потенціалу гідробіонтів для конверсії біосировини та забруднень стічних вод» (2018-2019 рр., держ. реєстр. №0117U002389) та ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» - «Аналітичні дослідження сучасного стану діючих водоочисних споруд та визначення шляхів їх удосконалення» (2012 р., держ. реєстр. №0111U007853); регіонального значення: «Розробка змін до «Регіональної програми «Питна вода Луганщини» на 2006-2020 роки» (2016-2017 рр., держ. реєстр. №0117U002665); місцевого значення: «Розробка схеми оптимізації систем водопостачання та водовідведення м. Житомир» (2012 р., держ. реєстр. №0112U003839), «Провести дослідження та визначити щільність твердих побутових відходів (ТПВ) м. Рівного» (2014 р., держ. реєстр. №0115U004390), «Проведення досліджень для визначення методу знезараження питної води в системі водопостачання м. Харків», (2014-2015 рр., держ. реєстр. №0115U003066), «Розробка норм надання послуг з вивезення твердих побутових відходів з м. Хмельницький» (2015 р., держ. реєстр. №0115U0068740), «Розробка стратегії розвитку системи підготовки питної води в м. Миколаєві» (2016 р., держ. реєстр. №0116U006117), «Роботи з визначення морфологічного складу побутових відходів у зимовий період, які утворюються в м. Хмельницький» (2017 р., держ. реєстр. №0117U002662), «Розробка схеми санітарної очистки міста» (2016-2017 рр., держ. реєстр. №0117U002663),

«Науково-технічні послуги в галузі інженерії «Роботи з визначення морфологічного складу побутових відходів, які утворюються в м.Хмельницький» (2017 р., держ. реєстр. №0117U006201).

Мета та завдання дослідження.

Мета роботи – наукове обґрунтування нових енергоресурсоефективних й екологічних біотехнологій для інтенсифікації процесів підготовки питної води та утилізації твердих побутових відходів на об'єктах комунальної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

- встановити вплив біологічних факторів на перебіг процесів знезалізнення і деманганації природних вод при фільтруванні через зернисте завантаження в залежності від технологічних параметрів швидких фільтрів і складу вихідної води;
- визначити мікроорганізми, присутніх у завантаженні працюючих швидких фільтрів знезалізнення, які беруть участь у процесах знезалізнення і деманганації води, встановити їх родову приналежність. Оцінити кількісні співвідношення між мікроорганізмами різних мікроценозів в залежності від складу вихідної води;
- отримати шляхом мутагенезу високоефективні культури залізобактерій, які сприяють видаленню мангану, та оцінити можливість їх використання для інтенсифікації процесу деманганації води. Віднайти оптимальні комбінації селектованих культур з урахуванням якості вихідної води;
- обґрунтувати можливі шляхи інтенсифікації процесів знезалізнення і деманганації у зернистому завантаженні фільтрів при застосуванні інокуляту культур залізобактерій та їх сумішей; розробити технологічну схему та визначити оптимальні параметри (включаючи вибір фільтруючого завантаження) для інтенсифікації процесу знезалізнення і деманганації води шляхом внесення змішаних культур залізобактерій; встановити ефективні методи фінішного знезараження води; запропонувати апаратурну реалізацію процесу;
- експериментально встановити вплив концентрації розчиненого кисню на процеси нітри- денітрифікації у фільтрах деамонізації; отримати культури мікроорганізмів, які забезпечують перебіг процесу деамонізації у швидких фільтрах, встановити їх родову приналежність. Визначити кількісне розподілення мікроорганізмів за висотою фільтруючого шару;
- розробити стохастичну математичну модель впливу технологічних параметрів фільтру на розподілення в ньому нітри- та денітрифікуючих мікроорганізмів та ефективність процесу деамонізації, здійснити її оптимізацію та створити відповідний розрахунковий алгоритм. Реалізувати алгоритм у вигляді комп'ютерної програми;
- дослідити можливість інтенсифікації роботи фільтрів деамонізації шляхом внесення культур чистих мікроорганізмів та їх сумішей. Запропонувати відповідну технологічну схему для реалізації процесу;
- вивчити особливостями розвитку різних груп мікроорганізмів, кількісно

оцінити їх співвідношення та встановити залежність від фракційного складу ТПВ для полігонів деяких населених пунктів України. Запропонувати математичну модель для прогнозування оптимального складу мікроорганізмів в тілі полігону залежно від морфологічного складу ТПВ, реалізувати модель у вигляді комп'ютерної програми;

- запропонувати технологію інтенсифікації біодеструкції ТПВ шляхом застосування комплексних препаратів, близьких за складом до природних мікроценозів;

- розробити узагальнену методологію застосування біотехнології на об'єктах комунальної інфраструктури населених пунктів.

Об'єкт дослідження – біотехнологічні процеси знезалізнення, деманганації та деамонізації води у швидких фільтрах при підготовці питної води та біодеструкції органічних фракцій ТПВ при рекультивації полігонів.

Предмет дослідження – науково-технологічні основи та раціональні параметри біотехнологій видалення з підземних вод заліза, мангану і амонію на швидких фільтрах, біодеструкції органічних фракцій ТПВ і розробки біопрепаратів для її інтенсифікації при рекультивації полігонів.

Методи дослідження – мікробіологічні (виділення, культивування та дослідження морфологічних характеристик мікроорганізмів; визначення загального мікробного числа (ЗМЧ), фізико-хімічні (спектрофотометричне визначення заліза, мангану, сполук азоту, титрометричне визначення розчиненого кисню, рН-метрія), математичні (статистичне моделювання, алгоритмізація, об'єктно-орієнтоване проектування, кодування), економічні (економічна оцінка ризиків).

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено наукові основи і технологічні рішення застосування біотехнологій для вирішення нагальних проблем водоочисних станцій та полігонів твердих побутових відходів. Дістало подальшого розвитку вивчення основних закономірностей процесів очищення води від сполук заліза, мангану і амонію та біодеструкції органічних речовин ТПВ. Отримано такі нові результати:

Комплексні досліджено та охарактеризовано процеси видалення сполук заліза та мангану при фільтруванні води на швидких фільтрах з цеолітовим завантаженням. Встановлено, що при знезалізненні і деманганації води одночасно перебігають як фізико-хімічні, так і біологічні процеси, причому вплив біологічної складової зростає із збільшенням вихідної концентрації вказаних компонентів. З фільтрів знезалізнення різних водоочисних станцій виділено 10 культур залізобактерій, які відповідно до Визначника Берджі віднесено до родів *Siderocapsa*, *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, *Galionella*, *Metallogenium*, *Huyhomicrobium*.

Доведено можливість інтенсифікації роботи швидких фільтрів з цеолітовим завантаженням шляхом використання класичних біотехнологічних методів, зокрема внесенням культур залізобактерій (в тому числі селектованих) та підтриманні оптимальних умов для їх росту.

Отримано мутантні культури залізобактерій родів *Leptothrix* та

Sphaerotillus, що мають підвищену здатність окиснювати сполуки мангану у підземній воді.

Вперше показано, що при видаленні з підземних вод, що характеризуються близьким до нейтрального значенням рН, достатнім для розвитку мікроорганізмів резервом лужності та вмістом органічних речовин, сполук амонію у швидких фільтрах, крім процесів нітрифікації, перебігають також і процеси денітрифікації, а з мікроценозів крім нітрифікуючих бактерій родів *Nitrosomonas* та *Nitrobacter* також присутні і денітрифікатори – *Thiobacillus Denitrificans*. Розроблено стохастичну математичну модель для визначення оптимальної концентрації розчиненого кисню на вході у фільтр, реалізовану у вигляді комп'ютерної програми.

Вперше встановлено кореляційну залежність між морфологічним складом ТПВ та складом мікробних ценозів, визначено склад мікроорганізмів-деструкторів для окремих морфологічних фракцій. Розроблено математичну модель для опису процесів біодеструкції на полігонах ТПВ та визначення оптимального співвідношення мікроорганізмів різних груп в залежності від морфологічного складу відходів. Адекватність моделі підтверджено шляхом виділення і аналізу мікроценозів різних полігонів країни.

Розроблено узагальнену методику визначення можливості та оцінки ефективності застосуванні прийомів біотехнології для інтенсифікації технологічних процесів у міській інфраструктурі населених пунктів.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи полягає у впровадженні сучасних методів екобіотехнології у процеси підготовки питної води та переробки ТПВ. Зокрема, одержано наступні практичні результати.

Розроблено метод інтенсифікації роботи швидких фільтрів знезалізнення/деманганації води із застосуванням суміші культур родів *Leptothrix* та *Sphaerotillus*, а для випадку високого вмісту мангану – також суміші їх селектованих культур з підвищеною біодеструктивною здатністю щодо цього забруднювача.

Визначено оптимальні технологічні параметри процесу знезалізнення/деманганації води та режими фільтрування, в тому числі спосіб перенесення мікроорганізмів з інокуляту у завантаження фільтрів (патент на корисну модель № 125641). Розроблено технологічні схеми очищення води та їх апаратурну реалізацію (представлено в тексті дисертації); запропоновано надійні методи її знезараження; внесені відповідні удосконалення у конструкцію фільтрів. Вказані технологічні схеми і прийоми апробовано на ВОС міст Бориспіль (акт апробації від 12.05.2017 р.) та Харків (акт апробації від 14.04.2015 р.). Перевагами запропонованої біотехнології у порівнянні з існуючими методами деманганації на швидких фільтрах є можливість відмовитись від реагентів-модифікаторів та сильних окиснювачів, що суттєво знижує вартість процесу та підвищує його екологічну безпеку.

Розроблено метод видалення з води сполук амонію шляхом внесення інокулятів мікроорганізмів для нітри- та денітрифікації в різні частини фільтра,

що скорочує період запуску фільтрів з 14-15 до 1-2 діб. Економічна доцільність запропонованої технології визначається можливістю зменшення кількості очисного обладнання, зокрема резервних фільтрів.

Створено стохастичну математичну модель і розроблено методологію визначення оптимального вмісту розчиненого кисню на вході у фільтри деамонізації в залежності від якості вихідної води та конструктивних особливостей фільтраційного обладнання. Запропоновану технологію апробовано у водоканалі м. Хмельницький (акт апробації від 30.09.2017 р.).

Удосконалено біотехнологію інтенсифікації біодеструкції органічних сполук в тілі існуючих полігонів ТПВ, що дозволяє підвищити ефективність деструкції відповідних фракцій на 30 %. Розроблено математичну модель для прогнозування ефективності біологічних процесів та складу мікроценозів в залежності від морфологічного складу відходів. Технологію апробовано на полігоні ТПВ міст Хмельницький (акт апробації від 11.10.2016 р.) та Чернівці (акт апробації від 05.10.2017 р.).

Результати проведених досліджень використовуються у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури за спеціальністю 192 «Архітектура, будівництво та цивільна інженерія» спеціального виду діяльності водопостачання та водовідведення для студентів 4-го курсу з дисципліни «Водопровідні очисні споруди».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові ідеї та положення теоретичних і практичних досліджень розроблені і сформульовані автором особисто. Дослідження проведено за його безпосередньої участі у Підрозділі житлово-комунального господарства ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства».

Автором дисертації особисто визначено напрями досліджень, розроблено концепцію їх виконання, здійснено пошук та аналіз літературних даних, розроблено робочі гіпотези та обґрунтовано методологію постановки експериментів.

Внесок дисертанта включає: планування та проведення експериментів, розробку апаратного оформлення пілотних стендів, обробку, узагальнення та аналіз одержаних результатів досліджень, підготовку висновків. Автором особисто розроблено представлені в роботі технологічні схеми, методи і прийоми інтенсифікації процесів, конструктивні удосконалення обладнання. Саме ним також створено усі математичні моделі та програмний код для їх реалізації.

Окремі розділи експериментальної роботи виконувались за участю інших фахівців, що знайшло відображення у співавторстві в публікаціях. Зокрема, в експериментальних дослідженнях з оцінки ролі біологічних процесів у традиційних методах знезалізнення та деманганзації води брали участь О.С. Панченко та О.В. Кравченко (Комарова). Дослідження з виявлення ролі мікроорганізмів у шарі фільтруючого завантаження виконані разом з Н.Н. Черновою та О.С. Панченко, а з виявлення продуцентів магнітних наночастинок серед залізо- та манганоокисних бактерій – спільно з д.т.н.

С.В. Горобець, М.О. Булаєвською, О.С. Панченко. Роботи з біологічної нітрифікації у процесі підготовки питної води здійснені сумісно з д.х.н. Є.В. Кузьмінським, О.С. Панченко, В.В. Мотроненко, Є.Я. Смілянець, а з впливу аерації на склад мікроценозу та ефективність видалення нітрогенвмісних сполук на швидких фільтрах – разом з д.б.н. О.Ю. Галкіним та О.С. Панченко. Методологічні підходи з виділення та ідентифікації залізобактерій розроблені разом з д.х.н. Є.В. Кузьмінським та О.С. Панченко. Дослідження з біодеструкції органічних речовин та встановлення складу ТПВ проведені сумісно з к.т.н. І.В. Сатінім.

Методологія визначення можливості та оцінки ефективності інтенсифікації процесів у комунальному господарстві з використанням біотехнологій також є особистим надбанням здобувача. Особистий внесок автора у працях, опублікованих у співавторстві, полягає в теоретичному і методологічному обґрунтуванні мети та основних напрямків досліджень, розробці методики експериментальних досліджень, узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків. Ідеї співавторів наукових праць в дисертаційній роботі не використовувались.

Апробація результатів роботи. Результати наукових досліджень, отримані за темою дисертації, доповідались та обговорювались на Міжнародних конгресах «Екологія, Технологія, Економіка, Водопостачання, Водовідведення» (ЕТЕВК-2015 та ЕТЕВК-2017, м. Чорноморськ, 2015 та 2017 рр.), Міжнародних науково-практичних конференціях: «Ресурсозбереження та якісне водозабезпечення - стратегічний напрямок розвитку водопровідно-каналізаційного господарства України», 7-12 лютого 2017 р., м. Яремча, IX та X науково-практичних семінарах «Ресурсозбереження та висока якість послуг – стратегічне завдання розвитку житлово-комунального господарства України», 4-9 лютого 2014 року та 10-15 лютого 2015 р., м. Яремча, конференції «Україна і Литва. Інвестиційні та бізнес можливості», 20 квітня 2017 р. м. Київ, науково-практичному семінарі в рамках Міжнародної виставки обладнання та технології для поводження з муніципальними і промисловими стічними водами «Waste Water Management-2017» 25-26 квітня 2017 р. м. Київ, III-му Міжнародному Екологічному форумі «Вода та Енергія» 5-6 жовтня 2017 р. м. Львів, XIII Міжнародному конгресі «Інституційні та технічні аспекти реформування житлово-комунального господарства» 7-9 листопада 2017 р., м. Київ, науково-практичному семінарі в рамках XV Міжнародної спеціалізованої виставки «AQUA UKRAINE-2017», X Міжнародній спеціалізованій виставці «Енергоефективність. Відновлювана енергетика-2017», у радіопередачах ТРК «Київ» - «Чистий Київ», Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання та водовідведення», 11-13 березня 2015 р. «Національний університет водного господарства та природокористування», Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми водопостачання та водовідведення Вода-2015» 9-11 вересня м. Одеса, XXV Міжнародній конференції «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» 23-25 вересня м. Одеса, Міжнародній

конференції « Львівський екофорум : Вода та Енергія» 19 листопада 2015 р., IX Міжнародному науково-практичному семінарі «Проблеми водопровідно-каналізаційного господарства та шляхи їх вирішення» 29 березня 2016 р., науково-практичній конференції «Міська інфраструктура. Час діяти» м.Миколаїв 8 червня, м. Херсон 9 червня та м. Львів 26 жовтня 2016р., Всеукраїнській нараді «Стан водопровідно-каналізаційного господарства. Вихід з кризи», IX та XI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (м. Київ, 2015 та 2017 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Природа для води» (м. Київ, 2018 р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 29 наукових роботах, серед яких, 20 наукових фахових статей (у т.ч. 1 стаття у виданні іноземної країни, 10 статей у вітчизняних журналах, які представлено у міжнародних наукометричних базах даних), 7 тез доповідей, 1 навчальний посібник, 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота вміщує вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел, додатки, анотацію. Загальний обсяг дисертації становить 363 сторінки комп'ютерного тексту, в т.ч. 92 рисунки; 70 таблиць; 2 додатки; список літературних джерел становить - 330 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджуваної у дисертації проблеми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, приведені методи дослідження.

Огляд літератури (розділ 1). Розглянуто сучасний стан та основні проблеми комунального господарства в Україні, зокрема у сферах водопостачання та поводження з ТПВ. Показано необхідність, а отже і актуальність, розробки методів інтенсифікації технологічних процесів у комунальній інфраструктурі населених пунктів, спрямованих на скорочення витрат матеріальних, енергетичних та інших ресурсів, що може досягатися шляхом більш широкого використання підходів і методів біотехнології

Виявлено, що найбільш актуальними для подальшого дослідження є процеси знезалізнення, деманганації і деамонізації підземних вод та біодеструкції ТПВ в тілі полігонів.

Вивчено сучасний світовий досвід застосування технологій знезалізнення води у комунальному водопостачанні. Показано, що у теперішній час найчастіше застосовуються фізико-хімічні (у зернистому завантаженні швидких фільтрів) та біологічні (у біофільтрах або біореакторах) методи. Перший з них може реалізуватися на водоочисних станціях будь-якої продуктивності, є простішим і доступнішим в експлуатації, в той час як другий застосовується переважно на невеликих об'єктах водопостачання у зв'язку з деякими складнощами його реалізації (Минц, 1964, Кульский 1977, Degremont 2007, Журба, Соколов, Говорова, 2004, Бедрій та ін., 2010).

У практиці водоочищення технології деманганації, зазвичай, реалізуються на спеціально модифікованих матеріалах, які потребують періодичної регенерації, що призводить до значного подорожчання процесу очищення (Кульський 1977, Абрамов, 1981, Degremont, 2007).

Роботи стосовно можливості окиснення мангану під дією мікроорганізмів найчастіше мають дослідницьку мету і на комунальних водоочисних станціях як в Україні, так і в інших країнах світу, подібні технології практично не застосовуються.

Інформаційні дослідження щодо існуючих фільтраційних технологій видалення з води амонію показали, що хоча процеси у швидких фільтрах деамонізації, безумовно, схожі з процесами нітри- денітрифікації, які відбуваються при очищенні стічних вод, можливість їх інтенсифікації методами біотехнології вивчена недостатньо.

За результатами аналізу сучасного стану поводження з ТПВ в Україні виявлено, що актуальною залишиться проблема рекультивації полігонів. Оскільки більша частина відходів відноситься до органічної складової, процеси, що перебігають у тілі полігону, мають біологічний характер. Згідно наявної у літературних джерелах інформації основна проблема складнощів моделювання і управління процесами на полігонах ТПВ полягає у винятковості їх структури, яка визначається морфологічним складом відходів, особливостями їх вивезення, наявністю сортування, строком перебування, кліматичними умовами тощо.

За результатами аналізу проведеного науково-технологічного огляду літературних джерел визначено основні напрями і завдання подальшої роботи.

Матеріали і методи досліджень (розділ 2). Отримання культур мікроорганізмів відбувалось з природних мікроценозів, утворених в реальних технологічних процесах, зокрема, культури залізобактерій були виділені із завантаження швидких фільтрів (м.Фастів, смт Хорошів), нітри-денітрифікуючих бактерій - з фільтрів деамонізації Culligan Biofilter UX (м.Хмельницький), ТПВ бактерій-деструкторів – зі зразків ТПВ (міст Київ, Чернівці).

Визначення родової приналежності залізо- та манганоокиснюючих бактерій здійснювалось за схемою (наведена в основному тексті дисертації), розробленою під час досліджень на основі даних Визначника бактерій Берджі. Більш глибока класифікація, зокрема встановлення видової належності, у даній роботі не передбачалось.

Мікроорганізми з фільтрів деамонізації та зразків ТПВ розсівались до однорідних культур і класифікувались за морфолого-фізіологічними ознаками на основі Визначника Берджі. Визначення співвідношення різних мікроорганізмів в мікроценозах відбувалось за їх основними морфологічними особливостями за допомогою камери Горяєва. Отримання селектованих культур проводилось із застосуванням мутагенів з відбором колоній відповідно до здатності використовувати Mn з середовища.

Експерименти з інтенсифікації процесів знезалізнення, деманганації та

деамонізації здійснювались на реальних підземних водах, а також відповідних модельних розчинах. Підземні води характеризувались типовим для більшості джерел водопостачання країни фізико-хімічним складом, зокрема близьким до нейтрального значенням рН 6,8-7,5, загальною лужністю 3,5-6,5 ммоль/дм³, перманганатною окиснюваністю 2,0-4,8 мг/дм³.

Модельні розчини готувались шляхом додавання до підземної води, необхідної кількості відповідних реагентів для досягнення розрахованих вихідних концентрацій досліджуваних інгредієнтів.

Для апаратурного оформлення експериментів використовувались пілотні стенди, які моделювали необхідні технологічні параметри (ступень аерації, швидкість фільтрування, режими промивки і т.д.). Установка для знезалізнення-деманганації включала аератор та декілька швидких фільтрів з можливістю паралельної подачі на них води. Для деамонізації застосовувалась пілотна фільтрувальна установка Culligan UX-20 з фільтруючим завантаженням Culligan Biofilter.

При порівняльних дослідженнях з вибору фільтруючого завантаження використовувались: природний цеоліт (кліноптилоліт) Сокірицького родовища (Закарпаття) фракції 1-3 мм; кварцовий пісок фракції – 0,8-1,5 мм, гранульоване вугілля марки Gryphskand WG-12 (виробництва Польщі).

Дослідження морфологічного складу ТПВ проводились відповідно до чинних «Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів».

Узагальнення та обробка результатів експериментів здійснювались із застосуванням програмного забезпечення «Microsoft Excel for Mac» та «Apple Numbers», ПЗ «Microsoft Excel for Mac», «Apple Numbers», «AutoDesk Autocad», «QGIS», «Microsoft Visio», «Omnigraffle» та ін. Розробка, тестування і компіляцію програм відбувались у середовищі «Apple XCode».

Біотехнологічна інтенсифікація процесів знезалізнення і деманганації води (розділ 3). Найчастіше у практиці водопідготовки для очищення води від сполук заліза застосовується метод спрощеної аерації, який полягає в окисненні сполук заліза розчиненим у воді киснем з подальшим відділенням утвореного осаду на фільтрах. Стехіометрична кількість розчиненого кисню, потрібного для окиснення 1 мг Fe²⁺, становить – 0,14 мг. Але у реальних умовах згідно з роботами багатьох авторів (Кульський Л.А., 1977, Ніколадзе Г.І. 1979, Журба М.Г., Degremont, 2007) оптимальна величина цього показника зазвичай варіює у діапазоні 0,6-0,9 мг.

При дослідженні роботи швидких фільтрів на водозаборі смт Хорошів були отримані результати (табл.1), які свідчили про порушення залізо/кисневого співвідношення, характерного для звичайних умов знезалізнення. Під час експериментів цей показник знаходився у діапазоні - 0,12÷0,25, і відповідно до існуючих уявлень, глибоке видалення сполук заліза за таких умов було неможливим. Проте процес знезалізнення відбувався, що вказувало на вірогідність перебігу паралельно з фізико-хімічним більш ресурсоефективного процесу, скоріш за все, біологічного. Крім того, протягом

усіх досліджень фіксувалось зменшення вмісту амонію (з 0,6 до 0,3 мг/дм³), який є джерелом біогенного елементу - Нітрогену.

Таблиця 1. Середні за 6 фільтроциклів параметри знезалізнєння води свердловини смт Хорошів при вихідній концентрації заліза – 24,2 мг/дм³; температурі води - 13,2±1,6 °С

Концентрація ¹⁾ , мг/дм ³			Співвідношення залізо/кисень
розчиненого кисню	заліза у фільтраті	видаленого заліза	
2,0±0,1	7,6±0,2	16,6±0,2	0,12±0,03
2,0±0,1	8,5±0,2	15,6±0,1	0,13±0,02
2,0±0,1	10,7±0,3	13,5±0,2	0,15±0,03
4,0±0,1	4,7±0,1	19,5±0,2	0,21±0,03
4,0±0,1	6±0,2	18,3±0,3	0,22±0,02
4,0±0,1	8,4±0,2	15,8±0,2	0,25±0,02

¹⁾Довірчі інтервали визначено для $p < 0,05$

Для підтвердження зробленого вище припущення було проведено експерименти з фільтрування води з концентрацією заліза 13,3±0,8 мг/дм³ при різній швидкості фільтрування та за наявності у фільтруючому матеріалі бактерій. Згідно одержаних результатів (табл. 2) ефективність очищення корелювала не зі швидкістю фільтрування, а з кількістю бактерій, присутніх в 1 см³ завантаження. Зниження ефективності очищення та зменшення біомаси у фільтруючому шарі, зафіксоване на 60 годині фільтроциклу, зумовлено, вірогідно, так званим «старінням» культури (цей процес розглянуто нижче).

Таблиця 2. Кількість бактерій у завантаженні та ефективність видалення заліза за різної швидкості фільтрування

Тривалість фільтроциклу, год	Швидкість фільтрування - 7 м/год		Швидкість фільтрування - 5 м/год	
	ЗМЧ, КУО/см ³	Ефективність видалення заліза, %	ЗМЧ, КУО/см ³	Ефективність видалення заліза, %
12	320±70	25±2	1100±150	66±2
24	2000±100	54±2	4500±150	76±2
48	4500±150	75±2	5000±150	79±2
60	4300±150	73±2	4600±150	78±2

¹⁾Довірчі інтервали визначено для $p < 0,05$

Оцінку ролі біологічних факторів при знезалізнєнні/деманганації було здійснено шляхом порівняння ефективності при застосуванні різних окисників - гіпохлориту натрію та кисню повітря (рис. 1). Підземна вода у вказаній серії експериментів вміщувала 6,6±0,2 мг/дм³ заліза та 0,32±0,1 мг/дм³ мангану, температура води дорівнювала - 15±2°С. Хоча ефективність процесу знезалізнєння/деманганації в цілому оцінюється за результатом його двох стадій, а саме окиснення і затримання нерозчинних гідроокисних сполук заліза (III) та оксиду мангану (IV), ефективність реалізації другої стадії, безумовно, прямо залежить від першої. Отже ефективність досліджуваного процесу можна

оцінити і за ефективністю окиснення заліза та мангану до їх три- та чотирьохвалентних форм відповідно.

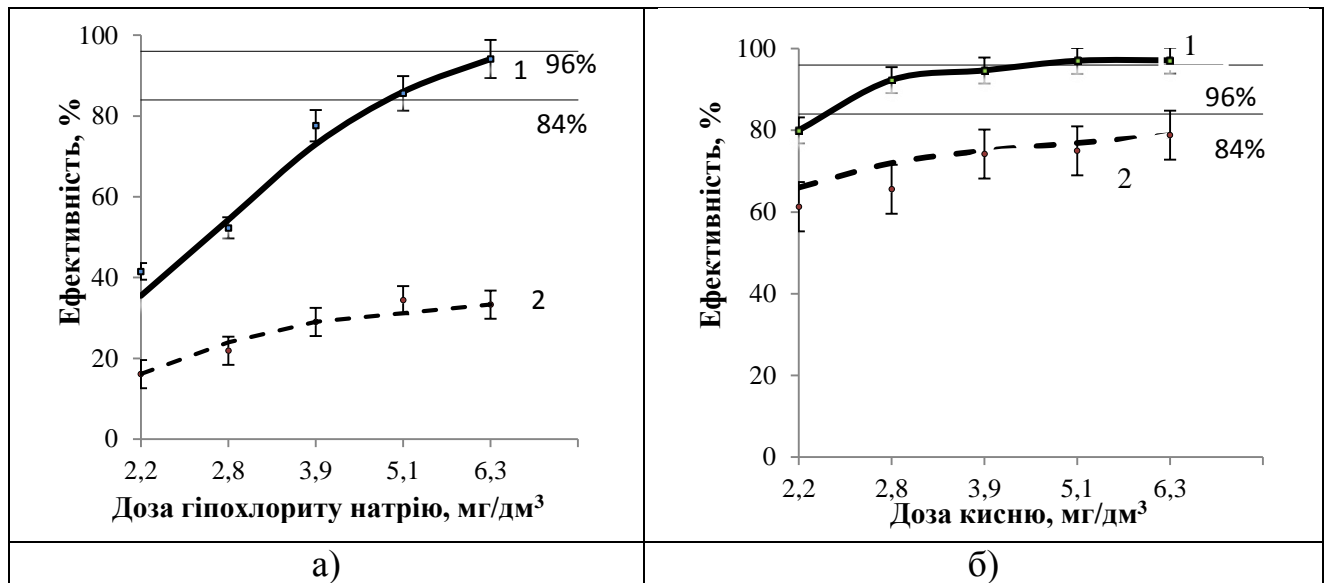


Рис. 1. Ефективність видалення заліза (1) і мангану (2) в середньому по результатах 5 фільтроциклів: а) - гіпохлорит натрію (хімічне окиснення); б) – кисень повітря (хімічне і біологічне окиснення)

Гіпохлорит натрію, як більш сильний окисник, сприяв інтенсивному зниженню концентрації заліза, але практично не впливав на ефективність видалення з води мангану. Навпаки, при насиченні води розчиненим киснем, особливо при його високих концентраціях, спостерігалось ефективне видалення мангану (при концентрації кисню 6 мг/дм³ ефективність перевищувала 68 %). За умови перебігу лише хімічного процесу при застосуванні сильнішого окисника процеси знезалізнення і деманганації були б ефективнішими.

Але результати експериментів засвідчили, що при застосуванні гіпохлориту натрію через його дезінфікуючі властивості мали місце лише фізико-хімічні процеси (автокаталітичне окиснення і затримання за рахунок адгезії), і ефективність очищення була нижчою у порівнянні із киснем. При використанні кисню паралельно перебігали як фізико-хімічні, так і біологічні процеси, і їх сумарна ефективність виявилась більшою. Тобто одержані результати не тільки підтвердили впливову роль мікроорганізмів у процесі знезалізнення/деманганації, але й показали можливість практичного застосування методів біотехнології для підвищення ефективності очищення води від заліза та мангану.

Важливо, що при проведенні аналогічних досліджень на воді з меншим вмістом заліза ($1,5 \pm 0,1$ мг/дм³), результати яких наведені в тексті дисертації, гіпохлорит натрію забезпечував більший ефект очищення, ніж кисень, тобто ефект біологічних факторів проявлявся лише при високому вмісті заліза і зростав зі збільшенням його концентрації у вихідній воді.

Слід зауважити, що при фільтруванні води відбувається кольматація (збільшення опору) фільтруючого завантаження, зумовлена накопиченням в

ньому затриманих забруднень, що призводить до необхідності періодичної промивки фільтрів. Згідно з «ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування» для промивки фільтрів повинна використовуватись очищена дезінфікована вода, яка вміщує залишковий хлор. За таких умов саме хлор (або інший дезінфектант) пригнічує розвиток мікроорганізмів у фільтруючому шарі, що перешкоджає нормальному біологічному процесу.

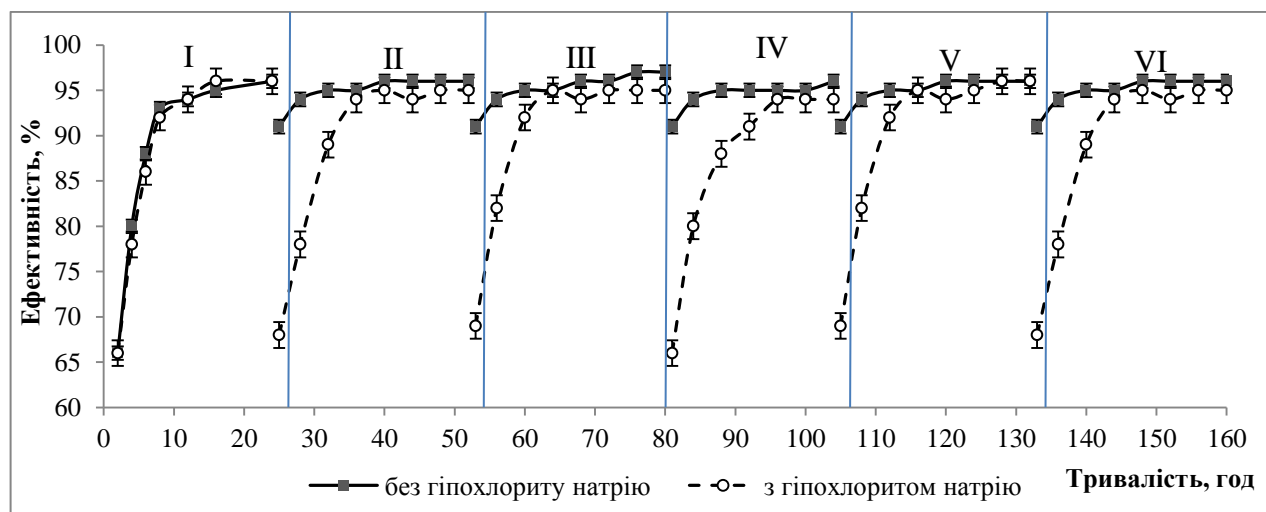
Для дослідження впливу застосованих при промивці фільтруючого шару знезаражуючих реагентів (зокрема, гіпохлориту натрію) на ефективність наступної стадії очищення було проведено 6 послідовних фільтроциклів, протягом яких промивка здійснювалась водою з дезінфектантом та без нього. При застосуванні промивної води з гіпохлоритом натрію на початку кожного наступного фільтроциклу спостерігалось суттєве зниження ефективності процесів знезалізнення/деманганації, зумовлене вимиванням із завантаження під час промивки затриманих в ньому сполук заліза та мангану, які діяли як каталізатори. Це вказувало на необхідність після промивки певного часу для накопичення у завантаженні вказаних речовин, що сприятиме відновленню ефективності процесу очищення. За відсутності у промивній воді гіпохлориту натрію, закріплені у завантаженні мікроорганізми вимиваються лише частково і на початку нового фільтроциклу їх кількість виявляється достатньою для підтримання біологічної складової процесу. По мірі накопичення у завантаженні гідроксидних сполук заліза та мангану паралельно з біологічним відновлюється і фізико-хімічний процес, що підвищує ефективність. Під час досліджень помітна різниця в ефективності знезалізнення спостерігалась лише протягом перших 6 годин фільтроциклу і далі в обох випадках (як з гіпохлоритом натрію, так і без нього) становила в середньому 96 %. При деманганації роль біологічного фактору була набагато значущою. Так, за відсутності у промивній воді дезінфектанту ефективність видалення мангану досягала 88-89 %, у той же час при промивці водою з гіпохлоритом натрію вказана величина не перевищувала 49 % (рис. 2).

Однак, як показали результати експериментів, після IV фільтроциклу ефективність деманганації води без дезінфекції фільтруючого матеріалу почала поступово зменшуватися, а величина ЗМЧ води, навпаки, збільшуватися, що, вірогідно, зумовлено «старінням» культури, оскільки закріплена мікрофлора в певній мірі перебуває у замкнутому середовищі. Крім того, у шарі завантаження спостерігалось активне слизоутворення, що погіршувало органолептичні показники води. Для нівелювання цього негативного фактору було запропоновано здійснювати періодичну дезінфекцію фільтра 1 раз на 4-5 промивок.

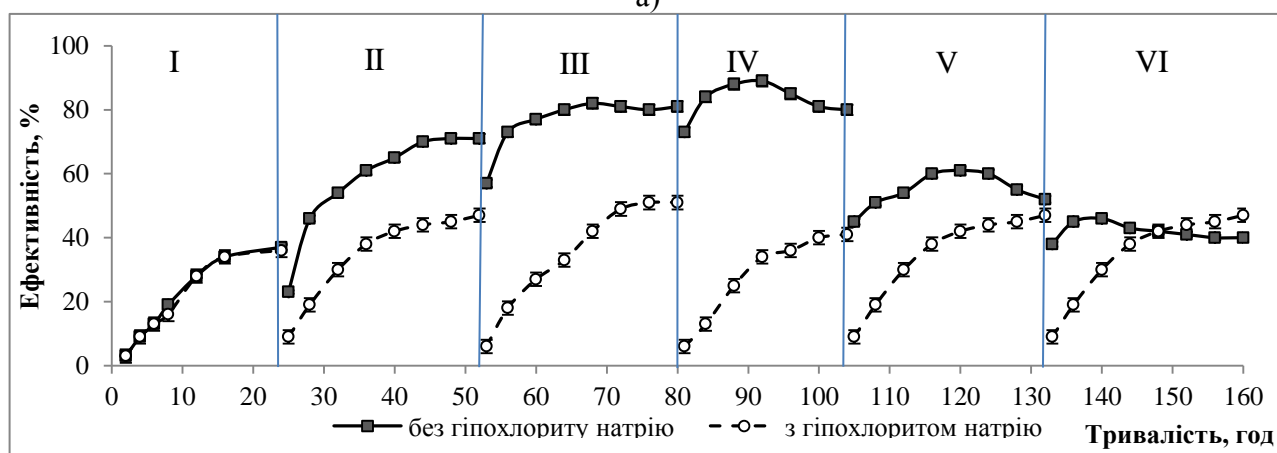
Таким чином, результати проведених досліджень експериментально підтвердили суттєву роль мікроорганізмів у процесах знезалізнення та деманганації.

Для ретельного вивчення біологічного агента із фільтруючого матеріалу різних фільтрів знезалізнення було виділено 10 культур залізо- та

манганоокислюючих мікроорганізмів, оцінку морфології яких було здійснено за розробленою схемою. Одержані результати дозволили віднести їх до родів *Siderocapsa*, *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, *Galionella*, *Metallogenium*, *Hyphomicrobium*. Отримання біологічного агента обумовило можливість біотехнологічної інтенсифікації технології знезалізнення/деманганації шляхом внесення у фільтруюче завантаження інокуляту мікроорганізмів.



а)



б)

Рис. 2. Залежність ефективності видалення з води заліза (а) та мангану (б) з використанням при промивці гіпохлориту натрію та без нього; I, II, III, IV, V, VI - фільтроцикли

Для практичної реалізації цього процесу, насамперед, було вивчено технологічні особливості процесу та встановлено ефективність різних культур мікроорганізмів. З цією метою три модельні розчини із заданою концентрацією заліза та мангану фільтрувались через завантаження, попереднє оброблене інокулятами з різних культур мікроорганізмів. За результатами досліджень бактерії роду *Leptothrix* сприяли більш ефективному видаленню мангану при його невисоких концентраціях, в той час як представники роду *Sphaerotillus*, були ефективнішими при високому вмісті. Одночасно було встановлено, що деякі мікроорганізми, наприклад, *Hyphomicrobium* при висіванні

однокомпонентної культури з підтримуючого середовища АРНА М381 на фільтрувальному завантаженні взагалі не забезпечували помітного розвитку.

Враховуючи, що вказані культури були виділені з мікроценозів фільтруючого матеріалу, вірогідна наявність симбіотичних залежностей між організмами різних видів, що відкриває більш широкі можливості використання як біологічного агента не окремих культур, а їх сумішей. Тому, у подальших дослідженнях було вивчено кількісний склад мікроценозів, виділених з завантаження фільтрів знезалізнення (табл. 3), які працюють у смт Хорошів (вміст заліза у різних свердловинах водозабору - 17-25 мг/дм³) та м. Фастів (вміст заліза до 4 мг/дм³).

Таблиця 3. Кількісний склад мікроорганізмів різних груп у завантаженні фільтрів знезалізнення

№	ЗМЧ, КУО/г	Відсоток мікроорганізмів, % ¹⁾							Розрахункова кількість мікроорганізмів, КУО/г ²⁾						
		<i>Leptothrix</i>	<i>Sphaerotillus</i>	<i>Metallogenium</i>	<i>Siderocapsa</i>	<i>Galionella</i>	<i>Hyphomicrobium</i>	Інші ³⁾	<i>Leptothrix</i>	<i>Sphaerotillus</i>	<i>Metallogenium</i>	<i>Siderocapsa</i>	<i>Galionella</i>	<i>Hyphomicrobium</i>	Інші
смт Хорошів															
1 ⁴⁾	4850	11	3	5	8	1	-	72	530	150	240	390	50	0	3490
2	12200	17	6	3	3	3	2	66	2070	730	370	370	370	240	8050
3	12050	16	6	3	3	3	2	67	1930	720	360	360	360	240	8070
м. Фастів															
4	11000	24	3	7	10	-	-	56	2640	330	770	1100	-	-	6160
5	10500	22	4	10	11	-	1	52	2310	420	1050	1160	-	-	5460
6	10500	23	4	10	10	-	-	53	2415	420	1050	1050	-	-	5570

¹⁾ Середньоарифметичні значення, довірча межа для $p < 0,05$ складає $\pm 1\%$

²⁾ Середньоарифметичні значення, визначені згідно розд. 2, довірча межа для $p < 0,05$ складає ± 10

³⁾ Інші мікроорганізми не давали помітного росту на середовищі для виділення залізобактерій

⁴⁾ Проби відбирались в різні періоди літнього та осіннього сезонів 2017 р.

Отримані при цьому дані засвідчили про переважну роль у процесах знезалізнення води мікроорганізмів родів *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, *Metallogenium* та *Siderocapsa*. Представники рр. *Galionella* та *Hyphomicrobium* виділялись лише з фільтрів смт Хорошів (високі концентрації заліза) і були відсутніми у фільтрах м. Фастів (помірні концентрації заліза). Причому, як буде показано далі, більш технологічними виявились культури родів *Leptothrix* та *Sphaerotillus*, а тому саме вони були використані для подальших досліджень.

Також потрібно відзначити, що при фільтруванні модельного розчину, який не містив заліза, а концентрація мангану становила 2 мг/дм³, фіксувалось пригнічення росту залізобактерій і різке зниження ефективності процесу деманганації. Результати подальших досліджень підтвердили, що ефективно реалізувати процес біологічної деманганації води можливо лише за умови достатньої кількості у воді сполук заліза.

Підвищення активності біологічного агента може бути досягнуто шляхом створення селектованих культур, здатних сприяти більш глибокому видаленню з води мангану. З цією метою виділені раніше культури родів *Leptotrix* та *Sphaerotilus* оброблялись відомими мутагенами, зокрема УФ-опроміненням і HNO_2 , культури зберігались на спеціальному середовищі (дріжджовий бульйон для залізобактерій АРНА М381). Результати експериментів щодо впливу селектованих культур та їх сумішей на процеси знезалізнання/деманганації (табл. 4) показали, що хоча для всіх культур спостерігалась висока ефективність видалення заліза, вони суттєво відрізнялись по відношенню до мангану.

Таблиця 4. Ефективність видалення заліза та мангану з модельних розчинів за застосування селектованих культур

Селектована культура мікроорганізмів	Вміст на виході, мг/дм ³		Ефективність, %	
	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺
модельний розчин - 5 мг/дм ³ Fe(II) + 0,5 мг/дм ³ Mn(II)				
α рід <i>Leptothrix</i>	1,30±0,11	0,42±0,03	74±2	16±1
β рід <i>Leptothrix</i>	0,32±0,11	0,40±0,02	94±2	20±1
γ рід <i>Leptothrix</i>	0,19±0,08	0,39±0,01	96±2	20±1
α рід <i>Sphaerotillus</i>	3,40±0,10	0,29±0,03	32±2	42±1
β рід <i>Sphaerotillus</i>	2,20±0,15	0,19±0,02	56±2	62
рід <i>Leptothrix</i> та рід <i>Sphaerotillus</i> співвідношення 1:1	0,18±0,02	0,10±0,01	98±2	94±1
γ рід <i>Leptothrix</i> та β рід <i>Sphaerotillus</i> співвідношення 1:1	0,07±0,03	0,01±0,01	98±2	98±1
Вихідна популяція (контроль)	0,18±0,02	0,10±0,01	96±2	80±1
модельний розчин - 10 мг/дм ³ Fe(II) + 2 мг/дм ³ Mn(II)				
α рід <i>Leptothrix</i>	4,40±0,23	1,40±0,01	56±2	30±1
β рід <i>Leptothrix</i>	0,64±0,11	1,40±0,01	94±2	30±1
γ рід <i>Leptothrix</i>	0,28±0,06	1,10±0,02	97±2	45±1
α рід <i>Sphaerotillus</i>	7,20±0,10	0,95±0,02	28±2	52±1
β рід <i>Sphaerotillus</i>	5,15±0,13	0,69±0,02	49±2	65,5±1
рід <i>Leptothrix</i> та рід <i>Sphaerotillus</i> співвідношення 1:1	0,48±0,08	0,24±0,03	98±2	92±1
γ рід <i>Leptothrix</i> та β рід <i>Sphaerotillus</i> співвідношення 1:1	0,16±0,02	0,03±0,01	98±2	98±1
Вихідна популяція (контроль)	0,49±0,03	0,24±0,02	95±2	88±1

При фільтруванні модельних розчинів із застосуванням культури одного роду мікроорганізмів досягалась менша ефективність процесу, ніж із вихідним мікроценозом (16-62 % проти 80 %), в той час як суміш культур γ роду *Leptotrix* та β роду *Sphaerotillus* сприяли високій ефективності видалення мангану (до 98 %). Тому, саме ця суміш використовувалась у подальших дослідженнях.

Враховуючи, що культури селектованих мікроорганізмів в неасептичних умовах поступово елімінуються з мікроценозів, було розглянуто два

принципових технологічних підходи, а саме: періодичне введення у фільтруюче завантаження (1 раз на 3-4 промивки): суміші природних культур мікроорганізмів або суміші селектованих культур мікроорганізмів. Перший спосіб є дешевшим і доступнішим, оскільки потребує культивування і перенесення мікроорганізмів лише один раз на декілька фільтраційних циклів, другий - більш складний у реалізації, тому що внаслідок постійної елімінації селектованих культур необхідно підтримувати їх кількість шляхом безперервного введення інокуляту.

Для впровадження запропонованих схем необхідно було вирішити ряд технологічних задач, в тому числі: розробити ефективні прийоми перенесення інокуляту у завантаження фільтрів, підібрати найбільш придатне для вказаних цілей фільтруюче завантаження, визначити оптимальні параметри і режими фільтрування та промивки фільтруючого шару.

Найчастіше у практиці питного водопостачання для завантаження фільтрів застосовуються кварцовий пісок, природний цеоліт, активне вугілля, керамзит. Тому, саме вони були використані у дослідженнях щодо встановлення можливості закріплення на їх поверхні мікроорганізмів та впливу останніх на ефективність видалення сполук заліза і мангану (докладні результати приведені в основному тексті дисертації).

За результатами експериментів найбільшу здатність накопичувати біомасу бактерій у процесі фільтрування виявило активне вугілля (завдяки високій питомій поверхні), але при цьому воно було менш ефективним щодо затримання заліза і мангану. Крім того, акумуляція активним вугіллем сполук хлору (при промивці) призводила до збільшення необхідного для нарощування біомаси часу у наступних циклах фільтрування. Цеолітове завантаження, хоча і характеризувалось меншим питомим накопиченням біомаси, але через високу здатність цеоліту видаляти частину заліза фізико-хімічним шляхом, сумарна ефективність процесу очищення була вищою, ніж із активним вугіллем. При фільтруванні води через інші досліджувані матеріали спостерігалось як менше накопичення біомаси, так і нижча сумарна ефективність знезалізнення/деманганізації. Таким чином, найбільш доцільним для подальших досліджень серед фільтруючих матеріалів виявився – цеоліт.

Наступною важливою задачею було відпрацювання стадії інокуляції, реалізація якої могла відбуватися наступними шляхами:

- напрацювання мікробної біомаси у рідкому середовищі та оброблення нею завантаження фільтра;
- культивування бактерій на твердому середовищі, приготування суспензії мікроорганізмів та обробка завантаження фільтра рідким інокулятом.

При вирощуванні бактерій у рідкому середовищі спостерігався незначний ріст р. *Sphaerotillus* (колонії були невеликого діаметра), їх закріплення на фільтруючому матеріалі практично не відбувалось і ефективність видалення заліза і мангану не відрізнялась від контрольної проби.

На твердому середовищі помітний ріст давали мікроорганізми родів *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, у той час, як культури родів *Siderocapsa*, *Galionella*,

Hyphomicrobium, *Metallogenium* - практично не розвивались. Саме тому, у подальших дослідженнях використовувались мікроорганізми родів *Leptothrix* та *Sphaerotillus*. Для їх перенесення з твердого середовища застосовувався розчин з підвищеним солевмістом, який забезпечував ефективне змивання з нейтрального поживного середовища і сприяв закріпленню на цеолітовому завантаженні. При цьому необхідний час контакту інокуляту з фільтруючим матеріалом складав від 80 до 90 хвилин.

Невід'ємним етапом будь-якого процесу фільтрування є промивка фільтруючого матеріалу, особливість якої у даних дослідженнях полягала в присутності у фільтруючому завантаженні біологічного агента (мікроорганізмів), що потребувало вивчення та наступного відпрацювання її оптимальних режимів. З цією метою підземна вода (вихідна концентрація заліза - 15-17 і мангану - 1,9-2,2 мг/дм³) фільтрувалась через цеолітове завантаження протягом 24 годин. Після цього фільтр виводився на промивку.

Спочатку було визначено залежність між інтенсивністю подачі промивної води, вмістом у ній завислих речовин та величиною ЗМЧ (табл. 5). Оптимальним вважався такий параметр, коли із завантаження ефективно видалялись затримані забруднення (максимальний вміст завислих речовин), але не вимивалась мікрофлора (мінімальна величина ЗМЧ). За результатами експериментів оптимальна інтенсивність подачі промивної води становила - 15 л/с·м².

Таблиця 5. Визначення оптимальної інтенсивності подачі промивної води за тривалості промивки 20 хвилин

Інтенсивність промивки, л/с·м ²	Вміст у промивній воді	
	завислих речовин, г/дм ³	ЗМЧ, КУО/см ³
10,0±0,1	1,5±0,1	50±10
15,0±0,1	2,8±0,1	70±20
20,0±0,1	2,9±0,1	1530±80
30,0±0,1	3±0,1	2540±150

Виходячи з одержаної під час експериментів кривої залежності вмісту у промивній воді завислих речовин від часу промивки, було встановлено, що достатнім часом для промивки фільтруючого завантаження може вважатися - 20-22 хвилини. Величина напору води на промивному насосі обиралась, виходячи з умови подолання опору фільтруючого шару і подачі води на висоту лотків відведення промивних вод.

За результатами аналогічних досліджень із застосуванням водоповітряної промивки було визначено її оптимальний режим, а саме:

- продувка тільки повітрям з інтенсивністю 15 л/с·м² протягом 1-2 хв;
- сумісна промивка водою та повітрям з інтенсивністю подачі повітря - 15 л/с·м² та води - 8 л/с·м² протягом 15 хв;
- фінішна промивка водою з інтенсивністю 15 л/с·м² протягом 1-3 хв.

Як вказувалось раніше, для запобігання «старінню» культури необхідна

періодична обробка завантаження дезінфікуючим реагентом з подальшим відновленням в ньому мікрофлори за рахунок інокуляту. Експериментально було встановлено, що достатня ефективність дезінфекції при дозі гіпохлориту натрію 40 мг/дм^3 досягається лише при 30-хвилинній експозиції, а при дозах гіпохлориту натрію, які відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 повинні забезпечувати певну залишкову концентрацію хлору, необхідний час експозиції, перевищуватиме - 120 хв. Оскільки за таких умов визначений оптимальний час промивки 20 хв виявляється недостатнім, досягти ефективного знезараження фільтруючого завантаження за рахунок залишкового хлору, який міститься в очищеній воді (як це відбувається у традиційній технології) неможливо, а отже знезараження має здійснюватися окремою від промивки стадією.

Таким чином, знезаражуючий реагент повинен застосовуватися у двох процесах: знезараження води (перед подачею її споживачам) та дезінфекція фільтруючого завантаження. Враховуючи, що для дезінфекції завантаження потрібна більш висока доза натрію гіпохлориту (40 мг/дм^3), ніж для знезараження води, у запропонованій технологічній схемі доцільно застосовувати високо концентрований розчин натрію гіпохлориту заводського виготовлення.

Не менш важливим фактором є максимально повне відмивання фільтруючого завантаження після дезінфекції, оскільки залишки дезінфікуючих реагентів у ньому можуть негативно вплинути на розвиток мікроорганізмів, а отже уповільнити біологічні процеси. За результатами експериментів для ефективного видалення залишків хлору достатньо здійснювати промивку протягом 20 хв. Після повної відмивки завантаження фільтр заповнюється інокулятом і залишається в ньому протягом 90 хвилин (час було встановлено експериментальним шляхом).

Враховуючи важливість фінішного знезараження води, було досліджено ефективність застосування деяких знезаражуючих реагентів та їх комбінацій, зокрема визначено оптимальні дози дезінфектантів при фільтруванні води з вмістом заліза - $3,0\text{-}4,5 \text{ мг/дм}^3$ та мангану $0,3\text{-}0,4 \text{ мг/дм}^3$ (табл. 6).

Таблиця 6. Дози знезаражуючих реагентів, які забезпечують нормативні вимоги до питної води за мікробіологічними показниками на виході водоочисної станції

№	Реагенти	Доза ¹⁾ , мг/дм^3
1	Газоподібний хлор	$1,25 \pm 0,08$
2	Натрію гіпохлорит	$1,10 \pm 0,09$
3	Хлору діокси	$0,30 \pm 0,02$
4	УФ-опромінення	$112 \pm 2 \text{ мДж /см}^2$
5	Натрію гіпохлорит + діоксид хлору	$0,50 \pm 0,05 + 0,10 \pm 0,02$
6	Натрію гіпохлорит + УФ-опромінення	$0,49 \pm 0,05 + 44 \pm 2 \text{ мДж/см}^2$

¹⁾Дози гіпохлориту натрію та газоподібного хлору визначені за активним хлором.

Доречно також відзначити, що для кожного конкретного об'єкту оптимальні дози знезаражуючих реагентів потрібно уточнювати, а УФ-опромінення на кінцевій стадії водопідготовки через відсутність пролонгованого ефекту може застосовуватися лише у комбінації з іншим знезаражуючим реагентом. На підставі результатів досліджень для реалізації біотехнології знезалізнення і деманганції на швидких фільтрах було розроблено дві технологічні схеми, включаючи промивку фільтруючого завантаження, із використанням природних або селектованих культур мікроорганізмів.

У першій технологічній схемі (рис. 3) мікроорганізми родів *Leptothrix* та *Sphaerotillus* після культивування на твердому поживному середовищі змиваються вихідною водою. В отриманому змиві визначається їх чисельність та розраховуються необхідні об'єми суспензій для забезпечення оптимального співвідношення кількості мікроорганізмів (встановлюється лабораторним шляхом для реальної якості вихідної води).

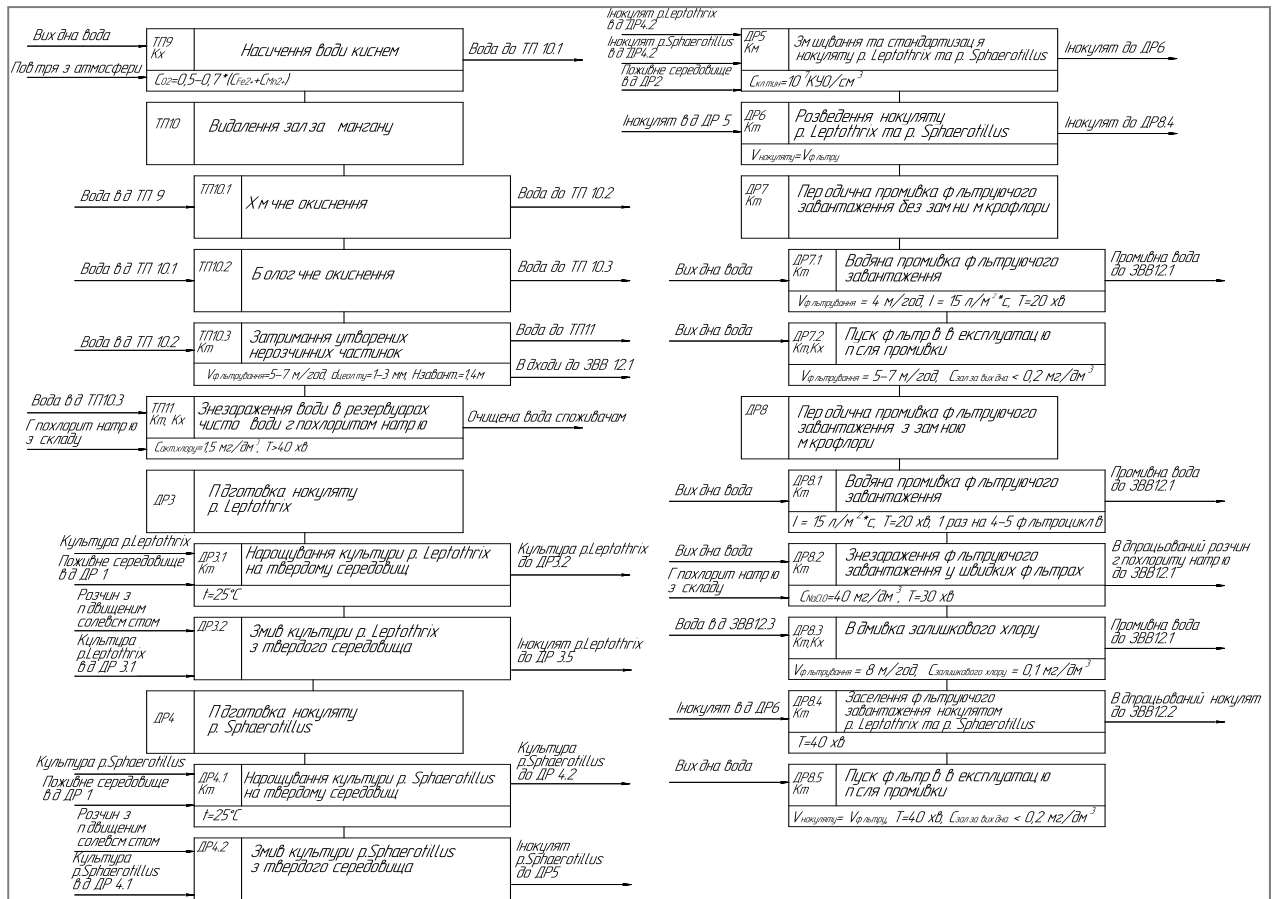


Рис. 3. Принципова технологічна схема реалізації процесу знезалізнення і деманганції води з використанням природних культур мікроорганізмів

Суміш суспензій вводиться у завантаження фільтра і залишається в ньому протягом 90 хвилин (в залежності від конструктивних особливостей фільтра процес може бути автоматизованим або здійснюватися вручну). Далі відпрацьований інокулят скидається в резервуар промивних вод,

зnezаражується і перекачується у систему обробки промивних вод. Підготовлений таким чином фільтр готовий до експлуатації.

Перед початком фільтрування вихідна вода насичується киснем повітря шляхом спрощеної аерації або за допомогою аератора. При спрощеній аерації введення повітря здійснюється розпиленням повітря безпосередньо у верхній частині фільтра, при цьому необхідна ефективність аерації досягається правильним підбором конструктивних елементів фільтра. При застосуванні аератора кількість повітря може регулюватися. Вміст розчиненого кисню після аерації контролюється лабораторно або автоматичним датчиком.

Насичена киснем вода подається у верхню частину безнапірних фільтрів і фільтрується зверху до низу через цеолітове завантаження, у товщі якого паралельно перебігає ряд процесів: за рахунок кисню повітря відбувається хімічне окиснення Fe (II) до Fe (III), гідроліз останнього з утворенням нерозчинних сполук, які затримуються у шарі фільтруючого матеріалу за рахунок адгезії. Поступово на поверхні зерен цеоліту утворюється особлива плівка з нерозчинних гідроксидних сполук заліза, яка підвищує ефективність процесу знезалізнення води (діє як є каталізатор). У той же час, закріплені на поверхні цеоліта мікроорганізми, використовують залізо та манган як субстрат для живлення, сприяючи при цьому їх окисненню. Очищена вода з нижньої частини фільтра подається в резервуар чистої води, де обробляється розчином гіпохлориту натрію для дезінфекції. У розглянутій вище технологічній схемі швидкість фільтрування має становити - 5-7 м/год, що буде запобігати відриву закріплених на цеоліті мікроорганізмів та їх вимиванню із фільтра.

По мірі накопичення у фільтруючому завантаженні видалених забруднень поступово збільшується його опір і виникає необхідність промивки. Остання може бути реалізована водяним або водоповітряним способом. У першому випадку вихідна вода із спеціальної ємності подається насосом у нижню частину фільтра з інтенсивністю 15 л/с·м². Така інтенсивність, як було зазначено раніше, достатня для розпушування завантаження, але не призводить до відриву закріплених на поверхні цеоліту мікроорганізмів. Для запобігання пошкодження закріплених у завантаженні мікроорганізмів у фільтрі улаштовується спеціальна дренажна система, яка забезпечує рівномірне розподілення води за площею фільтра. Промивна вода через систему лотків збирається у верхній частині фільтра і самопливом відводиться у приймальний резервуар для обробки промивних вод.

При водоповітряному способі промивки повітря, а потім і вода також подаються у нижню частину фільтра через дренажну систему із сітчастих пластикових труб з невеликим діаметром отворів. Така конструкція, з одного боку, забезпечує барботування повітря, а з іншого, створює необхідний опір для рівномірного його розподілення по всій довжині труби. Відпрацьоване повітря відводиться в атмосферу, а промивні води збираються у відповідному резервуарі.

Система обробки промивних вод включає групу відстійників, які працюють у періодичному режимі. За відсутності на водоочисній станції

необхідних для цих цілей площ процес відстоювання промивних вод може бути інтенсифікований шляхом застосування коагулянтів (флокулянтів). По завершенню циклу відстоювання (орієнтовно 4-6 годин), освітлена надосадова рідина з відстійника повертається на початкову стадію очищення, а утворений осад періодично скидається на піскові майданчики для просушування.

По мірі «старіння» мікроценозу (4-5 фільтроциклів) відбувається поступове зменшення активності мікроорганізмів, що негативно впливає на ефективність процесу очищення. Тому, після кожної четвертої промивки необхідно здійснювати знезараження фільтруючого шару з наступним відновленням на ньому мікрофлори. Для цього після завершення промивки у фільтр подається вихідна вода та розчин гіпохлориту натрію, об'єми яких розраховані таким чином, щоб забезпечити дозу дезінфектанту біля 40 мг/дм³. По завершенню 30 хвилинної експозиції відпрацьований розчин натрію гіпохлориту скидається в систему обробки промивних вод, фільтр промивається водою з інтенсивністю - 15 л/с·м² протягом 20 хвилин, а промивні води також знаходять на подальшу обробку. Далі фільтр знову обробляється попередньо підготовленим інокулятом культур *Leptothrix* та *Sphaerotillus* протягом 90 хв і процес фільтрування повторюється.

Друга технологічна схема (рис. 4) відрізняється від першою тим, що для підтримання необхідної кількості селектованих культур мікроорганізмів у шар фільтруючого завантаження зі спеціальної витратної ємності насосом-дозатором безперервно подається відповідний інокулят.

Реалізація такої схеми потребує спеціальної конструкції фільтра для можливості забезпечення безперервної, рівномірної подачі в нього інокуляту. З цією метою у конструкцію швидких фільтрів знезалізнення води ФОВ (розробка ДП «НДКТІ МГ»), були внесені необхідні зміни (рис. 5).

Система подачі інокуляту являє собою 4 розташовані одна над одною променеві групи, кожна з яких улаштована з пластикових трубопроводів зі спеціальними отворами для забезпечення рівномірного розподілу необхідної кількості інокуляту у шарі фільтруючого завантаження. Діаметр отворів на дозуючих трубопроводах менший за розміри фракцій фільтруючого матеріалу, що виключає можливість їх забивання. На насосі-дозаторі для подачі інокуляту встановлюється тиск, достатній для запобігання зворотному току води з фільтра у витратну ємність, на випадок відключення насоса-дозатора передбачений відповідний клапан. За результатами роботи виготовлено креслення для фільтра діаметром 2 м, але дана конструкторська документація може бути застосована як базова для розробки фільтрів інших типорозмірів.

Апробація розробленої технології була здійснена на реальних підземних водах та на модельних розчинах. В залежності від якості вихідної води ефективність видалення заліза природними культурами складала 94-99 %, мангану – 71-87 %, а мутантними - 98-99 % та 94-97 % відповідно (табл.7). Варто зазначити, що вивчення особливостей фізіології селектованих мікроорганізмів та причин збільшення їх ефективності у даній роботі не передбачалось і можливо буде предметом наступних досліджень.

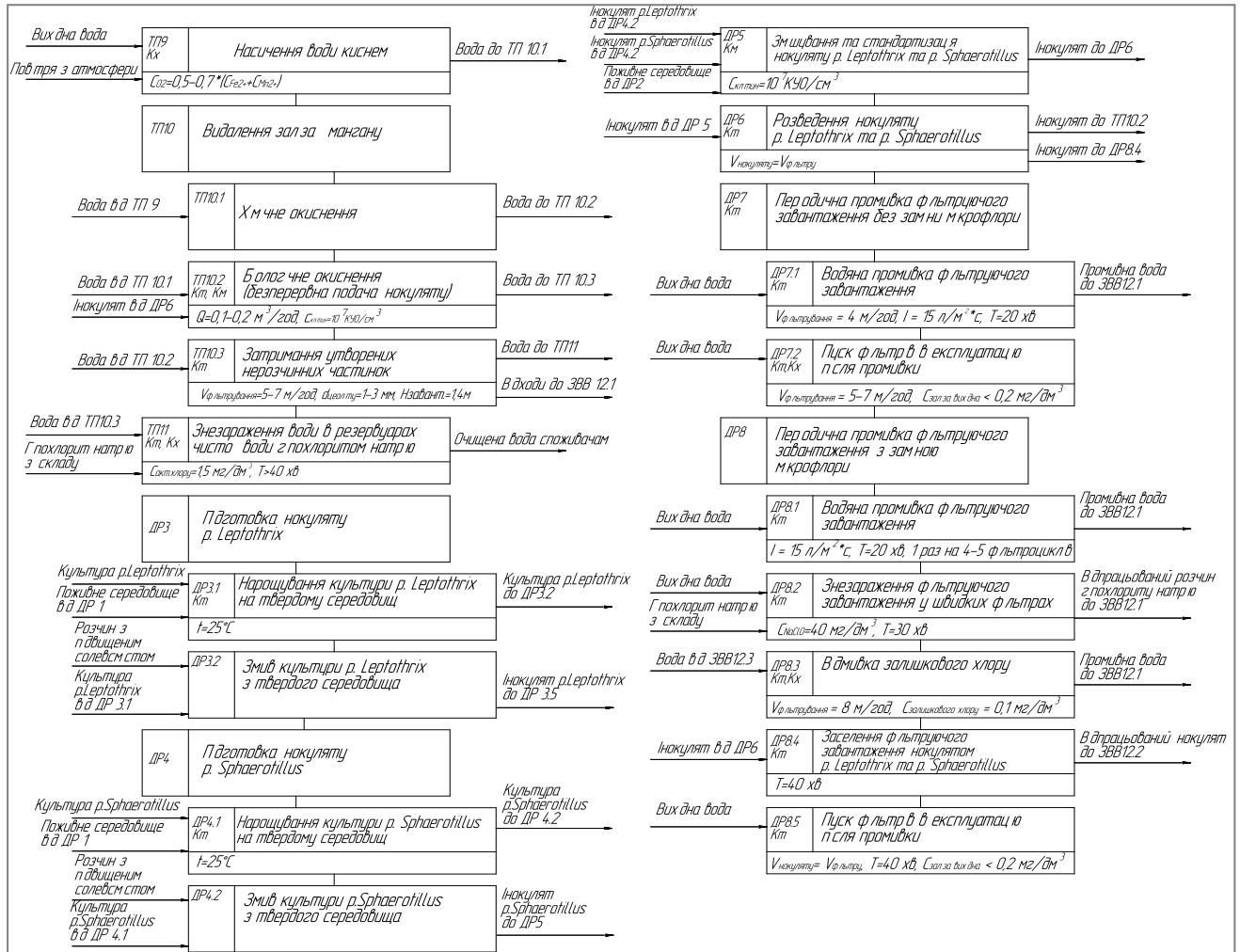


Рис. 4. Принципова технологічна схема реалізації процесу знезалізнення і деманганції води з використанням селектованих культур мікроорганізмів

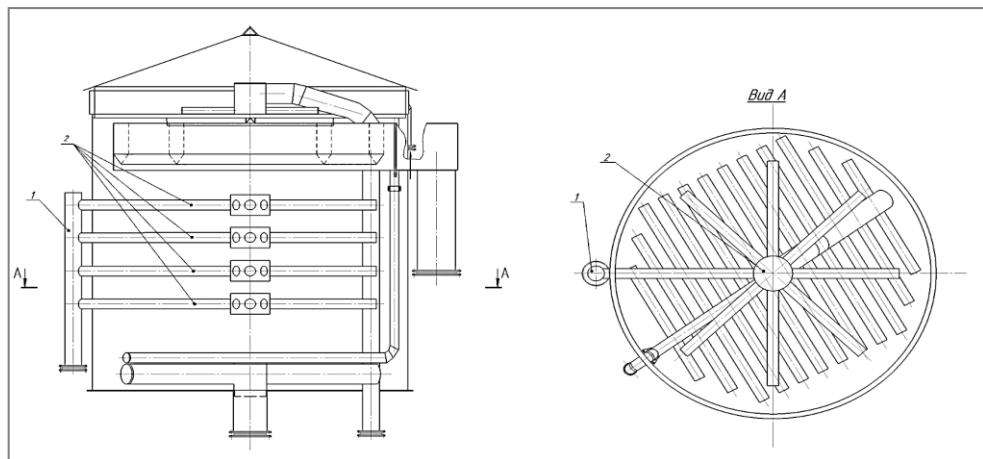


Рис. 5. Удосконалена конструкція швидких фільтрів знезалізнення і деманганції, придатна для безперервної подачі інкуляту

Таблиця 7. Усереднені результати апробації розробленої технології

Проба води	Тип культури	Концентрація заліза, мг/дм ³		Ефект., %	Концентрація мангану, мг/дм ³		Ефект., %
		початкова	кінцева		початкова	кінцева	
Підземна вода (Фастів)	Природні	9,1±0,2	0,47±0,03	94±2	відс.	відс.	-
Підземна вода (Хорошів)	Природні	22,8±0,2	0,33±0,02	99±2	0,84±0,02	0,11±0,01	98±2
	Мутантні	22,8±0,1	0,19±0,01	99±2	0,85±0,02	0,04±0,01	95±2
Підземна вода (Львів)	Природні	4,2±0,1	0,10±0,01	98±2	відс.	відс.	
Модельний розчин	Природні	15±0,1	0,70±0,08	95±2	1,50±0,05	0,25±0,02	83±2
	Мутантні	15±0,1	0,20±0,01	99±2	1,50±0,05	0,04±0,01	97±2
Модельний розчин	Природні	25±0,1	1,40±0,18	94±2	2,00±0,10	0,58±0,02	71±2
	Мутантні	25±0,1	0,42±0,03	98±2	2,00±0,10	0,11±0,01	94±2

Подальша інтенсифікація запропонованої технології можлива, наприклад, шляхом внесення у вихідну воду додаткових окисників. Як показали результати досліджень, попередня обробка води невеликими дозами озону (до 0,6 мг/дм³) та перекису водню (до 1 мг/дм³) стимулює розвиток мікроорганізмів р. *Leptothrix* та р. *Sphaerotillus*, що збільшує ефективність очищення (рис. 6). Хоча обидва реагенти відносяться до дезінфектантів, проте за певних умов вони, навпаки, можуть сприяти активізації мікроорганізмів, а отже і біотехнологічній інтенсифікації процесів очищення води.

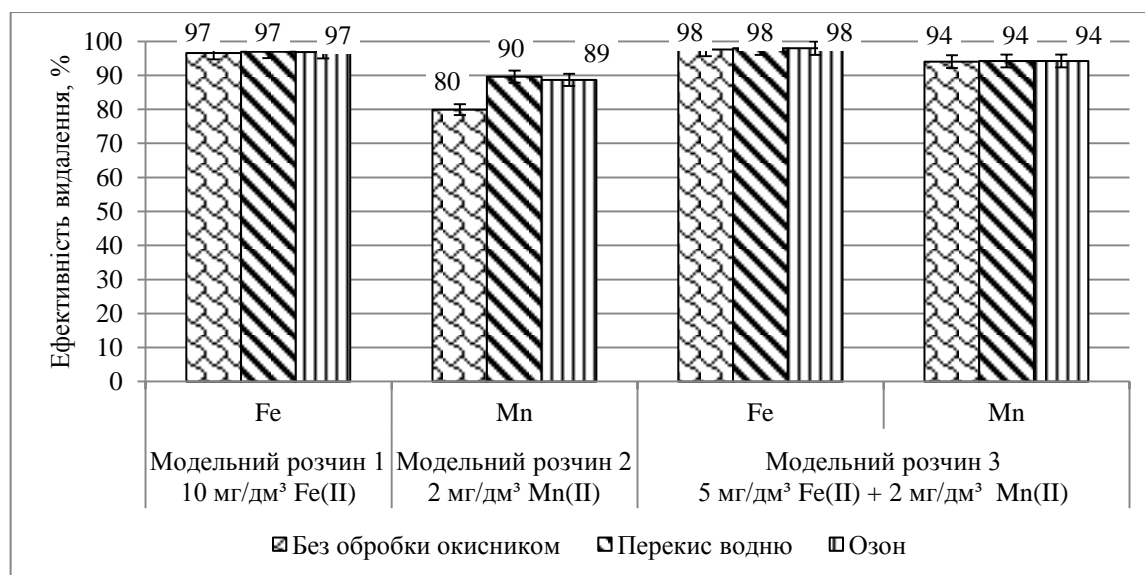


Рис. 6. Вплив окисників на ефективність видалення заліза та мангану методом біотехнологічної інтенсифікації

Крім того, в спільних дослідженнях з кафедрою біоінформатики факультету біотехнології і біотехніки КПІ імені Ігоря Сікорського, було встановлено можливість використання біотехнології на основі мікроорганізмів, які накопичуються магнітосоми. Результати біоінформаційного аналізу (з використанням ПЗ «BLAST») засвідчили можливість взаємодії магнітного поля

з мікроорганізмами родів *Leptotrix*, *Sphaerotillus*, *Gallionella*, *Hyphomicrobium*, що відкриває перспективи використання замість традиційних технологій знезараження води методу магнітної сепарації мікроорганізмів.

У порівнянні з традиційним методом знезалізнення на швидких фільтрах розроблена біотехнологія забезпечує більш високий рівень видалення забруднень, що дозволяє підвищити питоме навантаження на одиницю об'єму очисних споруд, сприяючи таким чином економії матеріальних та енергетичних ресурсів. Крім того, через використання для промивки фільтруючого завантаження вихідної води замість очищеної (питної) досягається економія дезінфікуючих реагентів. При високій вихідній концентрації заліза (понад 20 мг/дм³), необхідний у таких випадках процес 2-х стадійного фільтрування може відбуватися в 1 стадію, що крім скорочення кількості фільтрів дає можливість суттєво зменшити витрати на експлуатацію, в тому числі на матеріали, електроенергію, води на промивку фільтрів тощо. Ресурсоекономія при використанні нової біотехнології для видалення сполук мангану, насамперед, досягається через скорочення витрат на підготовку (модифікацію) та періодичну регенерацію спеціального фільтруючого завантаження, виключає необхідність використання таких реагентів як перманганат калію та діоксид хлору.

Інтенсифікація процесів видалення сполук азоту з підземних вод (розділ 4). Видалення з води солей амонію здійснюється, як правило, з використанням спеціальних швидких біофільтрів, в яких на спеціальному носії закріплюється мікрофлора, що утворюється з вихідної води. Ключовою проблемою експлуатації подібних фільтрів є значний час їх виходу на робочий режим після пуску.

Можливість інтенсифікації технології деамонізації підземних вод було досліджено на воді артезіанської свердловини у м. Хмельницький з застосуванням установки «Culligan HiFlo-6 UX-40» з аератором, завантаженої спеціальним фільтруючим матеріалом - Biofilter™. Згідно з технічною документацією для нарощення біомаси у фільтр протягом 2-3 тижнів подається вихідна вода з підвищеним вмістом розчиненого кисню, після досягнення у фільтраті певної концентрації амонію, фільтр переводиться в робочий режим. Експлуатаційні параметри установки були надані італійськими технологами.

Під час проведення 3-х циклів експериментів (табл. 8), показники якості підземної води були наступними: температура - $9 \pm 1^\circ\text{C}$, концентрація - амонію $3,19 \pm 0,01$, нітратів - $7,8 \pm 0,1$, нітритів $0,15 \pm 0,02$ мг/дм³, ЗМЧ - 60 ± 10 КУО/см³. Згідно з результатами експериментів зниження у фільтраті концентрації амонію корелювало з показником ЗМЧ, який також залежить від кількості мікроорганізмів у завантаженні фільтра. Крім того, при підвищенні ефективності процесу деамонізації одночасно у фільтрованій воді спостерігалось зростання вмісту нітратів. По завершенню підготовчого періоду фільтра на 19-й добі було зменшено подачу кисню, що відразу призвело до зниження концентрації нітратів, яка продовжувала зменшуватися протягом наступних 2 діб.

Таблиця 8. Динаміка зміни показників якості води у період підготовки фільтра (згідно керівництва з технічної експлуатації)

Доба	Концентрація ¹⁾ на вході, мг/дм ³	Концентрація ¹⁾ на виході, мг/дм ³					Ефективність видалення амонію, %
	Кисень	Амоній	Кисень	Нітрити	Нітрати	ЗМЧ, КУО/см ³	
1	8,4	2,40	5,8	0,26	10,3	65	25
4	8,4	2,01	3,9	0,32	11,0	305	37
8	8,3	1,27	2,2	0,25	13,4	700	60
14	8,3	0,39	1,1	0,24	15,9	940	88
18	8,3	0,26	0,6	0,26	16,4	960	92
19	5	0,25	0,2	0,18	9,9	900	92
20	5	0,27	0,2	0,14	6,6	920	91
21	5	0,28	0,2	0,19	3,5	940	91

¹⁾ Середньоарифметичні значення показників якості за 3 повторності, довірчий інтервал для $p < 0,05$ складав відповідно: для амонію та нітритів $\pm 0,01$ мг/дм³, нітратів та розчиненого кисню - $\pm 0,1$ мг/дм³, ЗМЧ - ± 10 КУО/см³, ефективності - $\pm 2\%$.

У підготовчий період високий ступень аерації води сприяє активізації процесу нітрифікації, а отже, і збільшенню вмісту нітратів, при зменшенні вихідної концентрації кисню у фільтрі паралельно з нітрифікацією розпочинається денітрифікація і вміст нітратів знижується. Порівнюючи одержані результати з висвітленими у літературі закономірностями процесів нітри- денітрифікації в технології очищення стічних вод, очевидно, що процеси у дослідному біофільтрі в цілому перебігали аналогічно.

Для підтвердження зробленого припущення в умовах робочого режиму установки (на 24 добу) у фільтраті було визначено склад мікробного ценозу. Серед інших було виділено мікроорганізми родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, які за літературними даними, досить поширені в активному мулі нітрифікаторів стічних вод, а також родів *Thiobacillus denitrificans*, які належать до денітрифікаторів. Мікроорганізми цих родів було виділено для зберігання і подальшого використання.

Оскільки вміст розчиненого кисню на вході фільтра протилежно впливає на процеси нітрифікації, яка потребує підвищеного вмісту кисню та денітрифікації, яка реалізується у мікроаерофільних умовах, їх закономірності було досліджено за різних концентрацій цього показника. Результати експериментів (табл. 9) показали, що при зменшенні подачі кисню і зниженні його концентрації з 8 до 5,5 мг/дм³ вміст амонію у фільтрованій воді знаходився у межах 0,11-0,12 мг/дм³, нітритів - 0,27-0,28 мг/дм³, а нітратів поступово зменшувався - з 11,0 до 2,4 мг/дм³, тобто при високих концентраціях кисню завдяки нітрифікації утворювалась значна кількість нітратів (цей показник перевищував вихідний), а по мірі зниження вмісту кисню за рахунок денітрифікації відбувалось і зменшення кількості нітратів.

Особливість протікання біологічних процесів у швидких фільтрах полягає в тому, що кисень, який подається лише на вхід фільтра, проходячи через

фільтруюче завантаження, споживається мікроорганізмами, в тому числі і нітрифікуючими, які окиснюють амоній до нітратів. Внаслідок цього концентрація кисню зменшується по висоті фільтра.

Таблиця 9. Ефективність деамонізації за різних концентрацій розчиненого кисню

Вхід фільтра		Вихід фільтра			
Розчинений кисень, мг/дм ³	Амоній, мг/дм ³	Розчинений кисень, мг/дм ³	Амоній, мг/дм ³	Нітрити, мг/дм ³	Нітрати, мг/дм ³
8,0	3,19	3,1	0,11	0,28	11,0
7,5	3,18	2,6	0,11	0,27	10,4
7,0	3,18	2,1	0,11	0,28	9,0
6,5	3,18	1,7	0,12	0,29	6,5
6,0	3,19	1,2	0,12	0,29	4,3
5,5	3,18	0,3	0,12	0,29	2,4
5,0	3,18	0,3	0,18	0,31	2,7
4,5	3,18	0,4	0,26	0,35	3,4
4,0	3,19	0,2	0,41	0,53	3,8
3,5	3,19	0,1	0,76	0,72	5,1
3,0	3,18	0,1	1,24	0,95	5,8
2,5	3,19	<0,1	2,2	1,76	6,4
2,0	3,18	<0,1	2,65	2,20	7,1
1,5	3,18	<0,1	3,05	3,23	8,2
1,0	3,18	<0,1	3,10	3,50	9,4

У таблиці наведено середньоарифметичні значення показників якості за 3 повторності, Довірчий інтервал для $p < 0,05$: для амонію та нітритів $\pm 0,01$ мг/дм³, нітратів та розчиненого кисню - $\pm 0,1$ мг/дм³, ЗМЧ - ± 10 КУО/см³, ефективності - $\pm 2\%$.

Для перебігу денітрифікації необхідні мікроаерофільні умови. Якщо концентрація кисню достатньо висока (в даному експерименті 6 мг/дм³ і більше), то кількість мікроаерофільних та анаеробних зон у фільтрі дуже мала, і процеси денітрифікації практично відсутні. При зменшенні у вихідній воді концентрації кисню кількість вказаних зон збільшується, що призводить до активізації денітрифікації. Але при значному скороченні вмісту кисню (в експерименті – нижче 4 мг/дм³) починає різко знижуватись ефективність нітрифікації, а отже, і видалення сполук амонію.

Результати досліджень щодо розподілення бактерій за висотою завантаження (докладні результати приведені в тексті дисертації) підтвердили описані вище залежності. Зокрема, якщо при дозі розчиненого кисню на вході фільтра 5,5 мг/дм³ денітрифікуючі бактерії спостерігались в нижній третині завантаження, то при дозі 6,5 – їх вдалось виділити лише з його нижніх 10 %. Що стосується видового складу, то у верхній частині фільтра переважали мікроорганізми родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter* (приблизно 70 % та 30 % відповідно), причому це співвідношення зі зміною концентрації кисню залишалось практично постійним. У нижній частині фільтра в основному

спостерігались представники роду *Thiobacillus*.

Таким чином, результатами досліджень було експериментально підтверджено, що процес нітрифікації відбувається переважно у верхній, насиченій киснем, частині фільтра, біологічним агентом для нього є мікроценоз, в якому превалюють мікроорганізмів родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, а у нижній частині фільтра, збідненій киснем, має місце процес денітрифікації, основним біологічним агентом якого є бактерії *Thiobacillus denitrificans*.

Для практичного впровадження біотехнологічної інтенсифікації роботи фільтрів деамонізації води шляхом внесення в їх завантаження культур мікроорганізмів необхідно було встановити оптимальні параметри процесу, а саме: визначити кількість інокуляту нітри- і денітрифікуючих мікроорганізмів та концентрацію розчиненого кисню. Для цього було розроблено стохастичну математичну модель, в якій за основні параметрами прийнято час перебування води у фільтрі (залежить від його конструктивних особливостей та швидкості фільтрування) та вміст у вхідній воді амонію та нітратів. При цьому перший фактор – фізично не пов'язаний з іншими, а два інших – пов'язані між собою, оскільки в процесі нітрифікації відбувається перетворення амонію у нітрати. Після здійснення математичних розрахунків (наведених в основному тексті дисертації) було визначено достовірний діапазон величин та коефіцієнти моделі.

Для оцінки адекватності розробленої моделі для трьох точок було проведено експеримент з визначення оптимального вмісту кисню на границі розподілення зон нітри- денітрифікації. Результати порівняння отриманих експериментальних даних з прогнозом за розробленою моделлю (табл. 10) засвідчили, що погрішність прогнозування моделі не перевищує 6,0 %, тобто є значно меншою величини, допустимої для інженерних розрахунків.

Таблиця 10. Оцінка адекватності моделі

Параметри моделі			Оптимальне значення вмісту кисню, мг/дм ³			Границя розподілення зон нітри- денітрифікації, частка висоти		
Час, хв	Амоній, мг/дм ³	Нітрати, мг/дм ³	Факт	Прогноз	Погрішність, %	Факт	Прогноз	Погрішність, %
8	1,5	0	5,80±0,04	5,72	1,0	0,22	0,267	6,0
8	0,8	30	3,12±0,06	3,17	2,3	0,44	0,443	0,5
12	2,0	30	8,70±0,04	8,81	2,4	0,12	0,095	2,8

Для можливості використання розробленої моделі необхідно здійснювати нормування величин. Крім того, ряд параметрів, наприклад, час перебування, також отримуються розрахунковим шляхом. Для зручності користування моделлю її було реалізовано у вигляді комп'ютерної програми мовою Apple Swift 4.0. Програма може безпосередньо приймати конструктивні параметри фільтру, витрати води, основні показники її якості (вміст амонію, нітратів), здійснювати розрахунок оптимального значення вмісту кисню після аератора

(або витрат повітря, якщо задана відповідна крива) та необхідних об'ємів інокулятів різних мікроорганізмів.

За результатами досліджень з використанням створеної моделі було розроблено технологію інтенсифікації роботи біофільтрів для видалення амонію, яка включає наступні стадії (рис. 7):

- приготування 3-х інокулятів бактерій *Thiobacillus*, *Nitrosomonas* та *Nitrobacter* у кількостях, розрахованих за Програмою. Чисельність мікроорганізмів підтримується на рівні - $1,0-1,5 \cdot 10^6$ КУО/см³, контроль здійснюється за оптичною густиною;
- інокулят 1 подається у нижню частину фільтра, де переважає процес денітрифікації, і залишається в ньому протягом 80-90 хв (цього часу достатньо для закріплення мікроорганізмів);
- суміш інокулятів 2 і 3, попередньо насичених киснем повітря, подається у фільтр і залишається протягом 80-90 хв, при цьому інокулят 1 також знаходиться у фільтрі;
- відпрацьовані інокуляти відводяться з фільтра у систему обробки промивних вод;
- фільтр переводиться у робочий режим, на вході фільтра підтримується оптимальна концентрація кисню повітря.

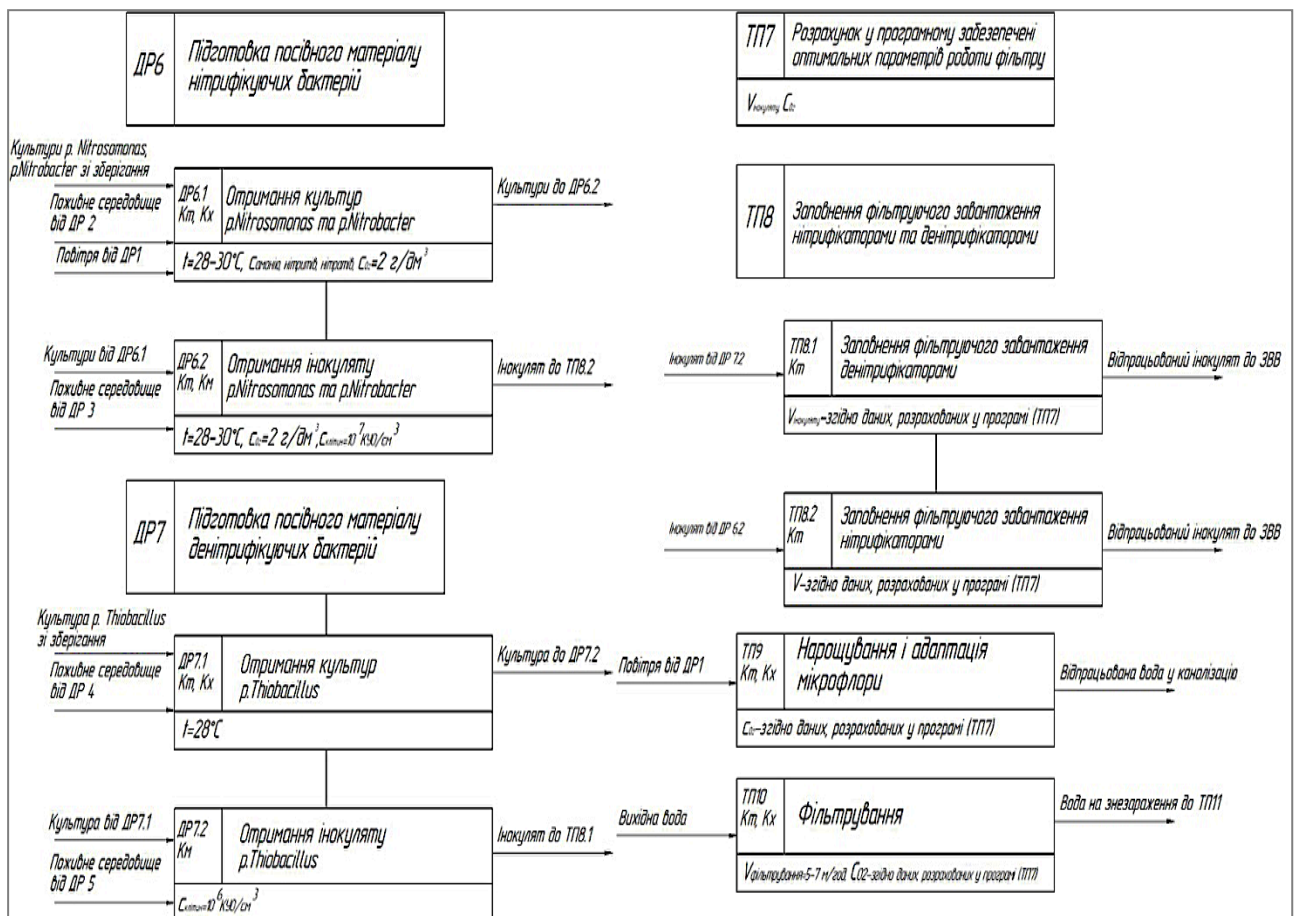


Рис. 7. Фрагмент технологічної схеми інтенсифікації роботи біофільтрів для видалення амонію

Апробація технології, здійснена на модельній установці «Culligan HiFlo-6 UX-40», підтвердила можливість суттєвого скорочення підготовчого періоду її роботи. За результатами експериментів при застосуванні інокулятів вже на третю добу спостерігався необхідний рівень видалення з води амонію (рис. 8).

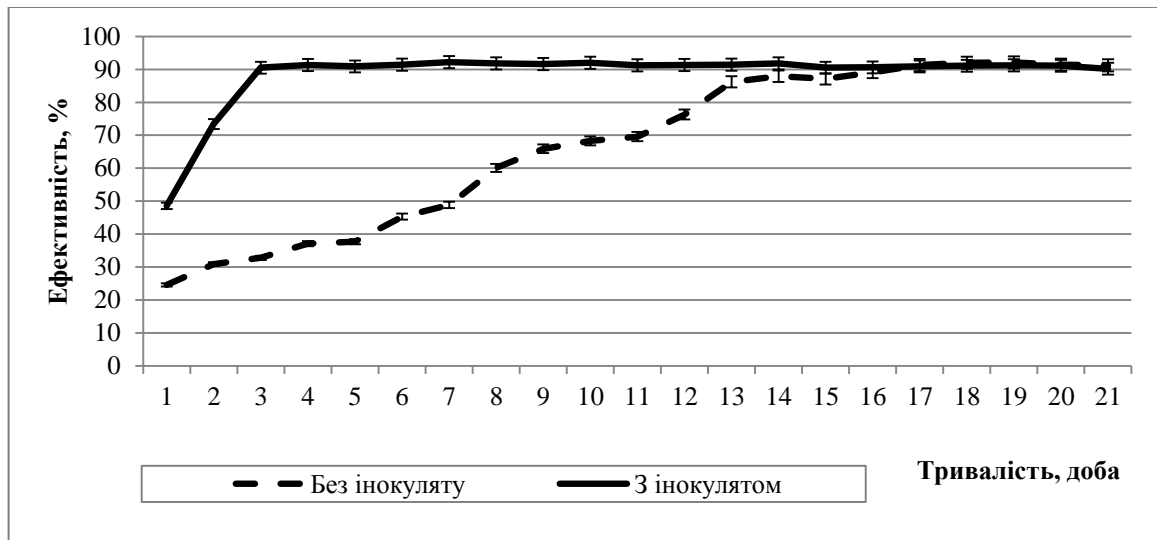


Рис. 8. Ефективність деамонізації води на модельній установці за обробки інокулятами та без неї

Виходячи із результатів досліджень, запропонована біотехнологія забезпечує економію матеріальних, енергетичних та інших ресурсів у порівнянні з існуючими методами завдяки можливості суттєвого скорочення непродуктивних витрат при експлуатації обладнання. Необхідність періодичного проведення підготовчої стадії фільтрів деамонізації потребує улаштування на водоочисних станціях більшої кількості фільтрувального обладнання. Скорочення часу введення у робочий режим фільтрів з 18 до 2 діб, дозволить, з урахування вимог ДБН 2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі і споруди», при кількості робочих фільтрів 8 од. зменшити кількість резервних - з 4 до 2 од., досягаючи таким чином значного зниження капітальних затрат.

Інтенсифікація процесу деструкції органічних сполук в шарі полігонів ТПВ (розділ 5). Завдяки важливій ролі біологічних процесів, які перебігають на полігонах ТПВ, вважається, що вони можуть розглядатися як біологічний реактор, а отже, і поводження з ними повинно здійснюватися за біотехнологічними принципами. Проте дотепер глибоке вивчення особливостей функціонування мікроценозів у тілі полігонів відсутнє.

Вирішення існуючих проблем на полігонах ТПВ уповільнюється, насамперед, через відсутність ефективних біотехнологічних методів деструкції органічних сполук. Це зумовлено складним характером поведінки відходів, нерівномірністю проміжків часу нашарування нового матеріалу, значною різницею у видовому та кількісному складі мікроценозів та іншими факторами, які залежать від специфічних параметрів полігонів (наявність джерел вуглецю, азоту, кисню або інших окисників, вологість, температура та ін.),

морфологічного складу ТПВ, тривалості їх перебування на полігоні, погодних умов, можуть суттєво відрізнятися і змінюватися у часі навіть на різних картах одного полігону.

Для виявлення взаємозв'язку між морфологічним складом ТПВ та утвореними в них мікроценозами було досліджено декілька проб, які надходять на полігони м.м. Києва та Хмельницького (рис. 9).

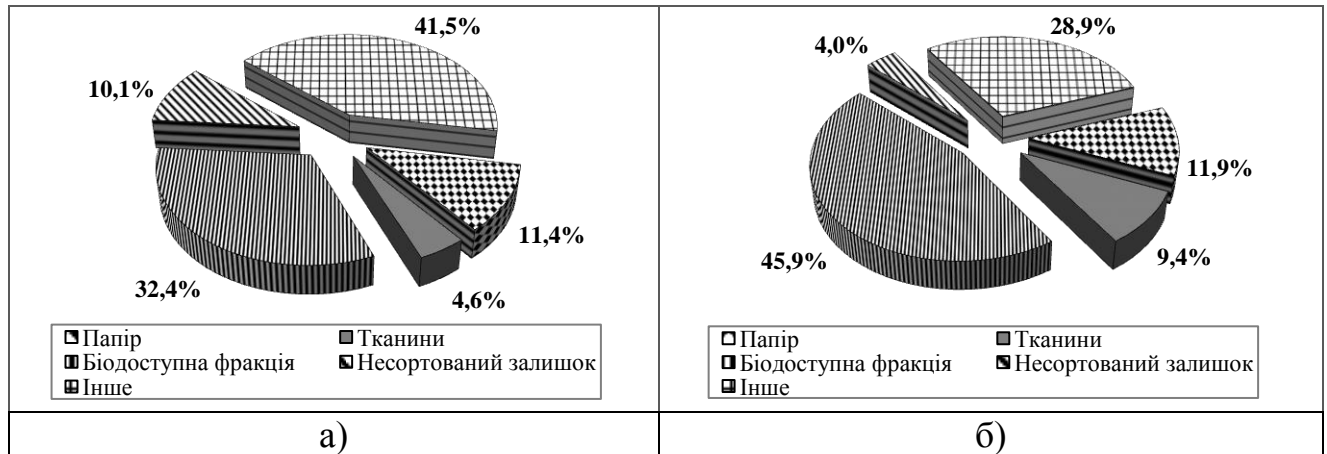


Рис. 9. Морфологічні складові відходів міст Київ (а), Хмельницький (б)

У несортованому та сортованому на фракції зразках через 10 днів перебування в умовах, близьких до реальних (доступність кисню моделювалась шляхом утримання зразків у прямокутних контейнерах, глибина яких відповідала глибині насипу на полігоні), було виділено мікроценози, визначено їх родову приналежність та кількісний склад (табл. 11).

Таким чином, для прогнозування оптимального складу мікроценозу для несортованих відходів, необхідно, в першу чергу, визначити морфологічний склад відходів. Але у реальних умовах під час перебування в тілі полігону відбувається безперервна зміна якісного і кількісного складу відходів, а отже змінюються і оптимальні мікроценози. Наприклад, протягом 1 та 5 років у відходах, розташованих на різних картах полігону, у складі мікроценозів спостерігались наступні зміни (табл. 12): загальна чисельність бактерій зменшилась з $2,1 \cdot 10^7$ до $4,6 \cdot 10^6$ КУО/см³, при цьому вміст бактерій роду *Bacillus* знизився з 36 до 12 %, *Micrococcus* і *Sarcina* - з 28 до 18 %, інші - з 16 до 6 %, а бактерій *Pseudomonas*, навпаки, збільшився - з 20 до 64 %.

Враховуючи значну складність дослідження стану реальних полігонів ТПВ, визнано за доцільне створити математичну модель для можливості імітації вірогідних біологічних процесів у тілі полігону та прогнозування складу утворених мікроценозів. Для цього застосовано змішане моделювання, в основі якого лежать фізичні залежності, але певні коефіцієнти визначаються за експериментальними даними.

Таблиця 11. Склад мікроценозів з різних фракцій ТПВ полігонів міст Києва та Хмельницький

Фракція	Мікроорганізми	Кількість, %	
		м. Київ	м. Хмельницький
Картон та папір	<i>Pseudomonas</i>	54±4	62±2
	<i>Micrococcus, Sarcina</i>	31±1	21±2
	<i>Bacillus</i>	6±2	10±1
	Інші	9±2	7±2
Тканини	<i>Pseudomonas</i>	58±2	62±2
	<i>Bacillus</i>	17±1	16±2
	Інші	25±2	22±2
Біодоступна фракція ¹⁾	<i>Bacillus</i>	42±1	46±2
	<i>Micrococcus, Sarcina</i>	35±2	25±2
	<i>Pseudomonas</i>	10±2	8±1
	<i>Escherichia</i>		3±1
	<i>Aerobacter</i>		2±1
	Інші	13±2	16±2
Несортовані відходи	<i>Pseudomonas</i>	34±2	22±2
	<i>Bacillus</i>	32±1	38±2
	<i>Micrococcus, Sarcina</i>	26±2	27±2
	<i>Escherichia</i>		4±1
	<i>Aerobacter</i>		3±1
	<i>Klebsiella</i>		2±1
	Інші	8±2	4±2

¹⁾ Під біодоступною фракцією розуміли рідку або тверду органічну фракцію, яка утворюється переважно з харчових відходів

Таблиця 12. Склад мікроценозів різних карт полігону ТПВ м.Хмельницький (в середньому по глибині)

Показник	Карта 1	Карта 2
Тривалість перебування ТПВ (приблизно)	1 рік	5 років
Кількість бактерій у складі мікроценозу, КУО/см ³	2,1*10 ⁷	4,6*10 ⁶
Склад мікроценозу по основних родах, %		
<i>Bacillus</i>	36±1	12±1
<i>Pseudomonas</i>	20±1	64±2
<i>Micrococcus, Sarcina</i>	28±2	18±1
Інші	16±1	6±1

Модель реалізована у вигляді комп'ютерної програми мовою Apple Swift 4.0 і працює наступним чином. На початковому етапі заповнюються два довідники: довідник матеріалів (фракцій ТПВ) та довідник мікроорганізмів. Оскільки перелік фракцій ТПВ не є стандартизованим, а перелік мікроорганізмів не є вичерпним, користувач має можливість коригувати вказані довідники. При цьому для матеріалів задаються наступні властивості: насипна

густина; гігроскопічність; вміст біодоступних складових (легко-, середньо- та важкодоступні форми вуглецю; азот); зольність.

Дана модель враховує лише вміст вуглецю і азоту, але за необхідності може бути розширена для урахування трансформації фосфору або сірки.

У довіднику мікроорганізмів вказуються такі параметри, як аеробність; швидкість деструкції за кожною складовою органогенів (вуглецю різної доступності, азоту); швидкість росту за оптимальних умов ($\text{КУО}/\text{см}^3 \cdot \text{доба}$).

При моделюванні в систему також необхідно ввести дані про комірки та проміжки часу. Під коміркою розуміється частина полігону або все його тіло (в залежності від поставленої задачі), в якій параметри відходів вважаються однаковими. Для кожної комірки задаються: геометричні параметри (висота, довжина, ширина); фракційний склад ТПВ (перелік фракцій та їх частка від загального вмісту); вологість.

Кількість комірок в програмному комплексі необмежена, але при їх збільшенні розрахунковий час моделі буде зростати.

Для кожного проміжку часу вказуються: тривалість; погодні умови, в т.ч. температура, відносна вологість повітря, наявність осадів (дощу).

Кількість проміжків часу також необмежена, але її збільшення призводитиме до зростання розрахункового часу моделі.

Після введення даних і запуску програма працює наступним чином:

- для кожної комірки, виходячи з морфологічного складу ТПВ, розраховуються середні параметри останніх;
- з урахуванням погодних умов першого проміжку часу розраховується вологість проби та кількість доступного кисню;
- базуючись на отриманих даних за моделлю IAWQ ASM 2 визначається оптимальний склад мікроценозу;
- розраховується маса розкладених речовин та зміна параметрів суміші протягом заданого проміжку часу, формується інформація щодо параметрів матеріалу комірки в кінці проміжку часу;
- результати розрахунку виводяться на дисплей;
- процес ітераційно повторюється для кожного проміжку часу.

Для практичного застосування програми необхідно правильно визначити оптимальні розміри комірок та проміжків часу в залежності від поставленої задачі та доступної інформації.

Оцінку адекватності розробленої моделі було здійснено для карти полігону м. Чернівці шляхом порівняння отриманих за моделлю прогнозних даних з експериментальними для часу перебування ТПВ на полігоні - 5 років; довідники заповнювались за літературними даними.

Порівняння прогнозованого складу мікроценозу з фактично виділеним (табл. 13) показало, що розбіжність між прогнозованими і фактичними даними за кількістю бактерій у складі мікроценозу дорівнювала - 12,5 %, а за морфологічним складом - не перевищувала 15 %, що засвідчило адекватність розробленої моделі.

Таблиця 13. Порівняння прогнозованих і фактичних показників мікроценозу

Показник	Прогноз	Експеримент	Розбіжність, %
Чисельність бактерій, КУО/см ³	1,8*10 ⁶	1,6*10 ⁶	12,5
Склад мікроценозу, %			
<i>Bacillus</i>	24±1	21	14,2
<i>Pseudomonas</i>	34±2	31	9,6
<i>Micrococcus</i>	42±2	38	10,5
Інші		10	

*Примітка. Порівняно низька кількість бактерій у складі мікроценозу зумовлена проведенням досліджень у весняний період при середньодобовій температурі 12±2°C

Одним з обмежень поточної версії програми є відсутність урахування масообміну між комірками, що приміром, виключає можливість моделювання просідання шарів з різним часом розміщення на полігоні. Така функціональність буде розроблена у подальшій роботі.

У переважній більшості описаних в літературі методів інтенсифікація процесів біодеструкції на полігонах ТПВ досягається внесенням монокультури активних мікроорганізмів, зазвичай представників роду *Bacillus*. Але склад препарату не підбирається індивідуально для кожного полігону, а отже, не завжди є ефективним. Для врахування особливостей конкретного полігону за результатами досліджень запропоновано технологію, яка передбачає попереднє програмне моделювання з вибору складу мікроценозу, оптимального для даних умов, з наступним формуванням з інокулятів монокультури біопрепарату, адекватного наявному складу ТПВ.

Оцінку ефективності запропонованої технології було здійснено лабораторним шляхом на зразках ТПВ полігону м. Київ з застосуванням традиційного препарату на основі культури *B. subtilis* та змішаного препарату, склад якого визначався моделюванням. Згідно з отриманими даними (табл. 14), використання суміші культур, близької до оптимального складу мікроценозу, призводило до більш ефективного накопичення біомаси в шарі ТПВ, а отже, прискорювало біодеструкцію і швидкість просідання зразка (на 26,4±0,2 %).

Таблиця 14. Порівняння ефективності деструкції органічної фракції традиційним препаратом та сумішшю визначених за моделлю культур

Показники	Препарат на основі <i>B. subtilis</i>	Суміш культур
Чисельність мікроорганізмів, КУО/см ³	не менше 1*10 ¹⁰	8*10 ⁹
Склад мікроценозу, %		
<i>Bacillus</i>	100	65
<i>Pseudomonas</i>		20
<i>Micrococcus</i>		15
Чисельність мікроорганізмів в шарі ТПВ через 5 діб, КУО/см ³	6,8*10 ⁶	9,2*10 ⁶
Просідання зразка ТПВ, см	8,7±0,1	11,0±0,1

Отже отримані позитивні результати підтвердили перспективність застосування біотехнологічних методів для інтенсифікації процесу біодеструкції речовин в тілі полігонів ТПВ під час їх рекультивації.

Економічна частина (розділ 6). Економічні чинники впровадження розроблених у даній роботі біотехнологій визначаються через застосування моделі врахування можливих ризиків.

Постачання води гарантованої якості знижує ризики: виникнення захворюваності населення внаслідок споживання неякісної води, погіршення побутових умов водовикористання, зростання кількості аварій на трубопровідних системах тощо. З техніко-технологічної точки зору розроблені біотехнології інтенсифікації процесів знезалізнення, деманганації та деамонізації дозволяють знизити капітальні затрати на будівництво і експлуатацію споруд, підвищити надійність і ефективність їх роботи та сприяють економії матеріальних, енергетичних, трудових та інших ресурсів.

Інтенсифікація процесів біодеградації органічних сполук на полігонах ТПВ, шляхом використання близьких за складом до природних мікроценозів препаратів, дає можливість прискорити швидкість рекультивації полігонів і, таким чином, підвищити екологічну безпеку цих об'єктів у порівнянні з альтернативними технологіями.

Розробка методології застосування біотехнології на об'єктах комунальної інфраструктури населених пунктів (розділ 7). Аналіз та узагальнення результатів проведених досліджень дозволили розробити методологію застосування прийомів біотехнології на об'єктах комунальної інфраструктури. Її створення зумовлено необхідністю уніфікації підходу до визначення можливості інтенсифікації процесів методами біотехнології при мінімізації витрат на проведення необхідних досліджень.

Методологія передбачає виконання ряду заходів з оцінки особливостей процесу, які можуть базуватись як на доступних літературних даних, так і на результатах додатково проведених експериментальних досліджень, і включає наступні основні етапи.

1. Оцінка можливості існування біологічного агента в умовах даного процесу. На цьому етапі, виходячи з технологічних параметрів процесу (температура, вологість, доступність органічних субстратів, час контакту з ними тощо), визначається принципова можливість існування мікроорганізмів за даних умов. Якщо вказані умови задовольняються, оцінюється можливість переносу мікроорганізмів у процес. Для переважної більшості процесів, які застосовуються у комунальній інфраструктурі, ці вимоги можуть досягатися за рахунок контакту з оточуючим середовищем.

2. Визначення ролі біологічних факторів в технологічному процесі. Цей етап передбачає оцінку ролі біологічних факторів, а отже, і максимально можливу ефективність інтенсифікації процесів біотехнологічними прийомами. Для ряду процесів, які відбуваються у комунальній інфраструктурі, роль мікроорганізмів відома і описана в літературі. Проте, як показали наші дослідження з інтенсифікації знезалізнення і деманганації води, існує висока

вірогідність ролі біологічних факторів у процесах, що вважаються виключно фізико-хімічними. Для точнішої оцінки ролі мікроорганізмів необхідно проведення двох паралельних експериментів, в одному з яких підтримуються стерильні умови. Наприклад, технологічні процеси у водопідготовки можна порівнювати за наявності попереднього знезараження та без нього.

3. Визначення біологічного агента. Переважна більшість процесів у комунальній інфраструктурі реалізується в неасептичних умовах, що збільшує вірогідність існування в них мікроценозів, які можуть розглядатися як біологічні агенти. Через особливості саморегуляції мікроценозів при незмінних умовах та досить тривалому часі їх склад формується таким чином, щоб оптимально відповідати умовам середовища. Тому, найчастіше саме ті мікроорганізми, які виділяються при звичайному перебігу технологічного процесу, і є найбільш придатними для існування за наявних умов. Отже визначення біологічного агента зводиться до аналізу існуючих мікроценозів конкретного процесу. Для класифікації мікроорганізмів використовуються їхні морфологічні ознаки. На практиці, як правило, проводиться висів мікроорганізмів на ряд середовищ, їх забарвлення різними способами та мікроскопіювання.

4. Отримання і зберігання чистих культур мікроорганізмів, які входять до складу біологічного агента. Отримання чистих культур проводиться шляхом розсівання на відповідні середовища та подальшого зберігання на твердому носії або у рідкому середовищі в залежності від особливостей конкретних мікроорганізмів.

5. Визначення кількісного складу мікроценозу. Для встановлення кількісного складу мікроорганізмів може застосовуватись розроблена у даній роботі методика (розділ 2). Визначення складу мікроценозів в залежності від зовнішніх умов та/або технологічних параметрів процесів відкриває можливості до більш глибокого розуміння особливостей їх перебігу. В ряді випадків, як показано в розділі 5, після отримання достатньої вибірки даних для прогнозування складу мікроценозу може застосовуватись математичне моделювання.

6. Інтенсифікація процесу шляхом внесення мікроорганізмів. Встановлення складу мікроценозу дозволяє перейти до нарощення культур (чистих або змішаних) і підготовки інокуляту з підтриманням необхідного співвідношення мікроорганізмів. Далі експериментальним шляхом здійснюється порівняння параметрів процесу з обробкою інокулятом та без нього. В деяких випадках (наприклад, як показано в розділі 3) виникає необхідність відпрацювання стадії переносу інокуляту у фільтруюче завантаження. При отриманні позитивних результатів наступним кроком є - технологічне оформлення реалізації процесу.

7. Інтенсифікація процесу шляхом внесення селектованих культур. Спочатку отримуються мутантні культури тих мікроорганізмів, які переважають у складі мікроценозу. Критерієм відбору мутантів є швидкість росту на середовищі зі значним вмістом забруднень, які повинні вилучатися в

основному технологічному процесі. Після отримання високоефективних культур здійснюються такі самі операції, як на етапі 6. При цьому зауважити, що в переважній більшості випадків мутанти мікроорганізми в неасептичних умовах поступово елімінуються з середовища, а тому їх концентрація повинна підтримуватись безперервним або періодичним внесенням додаткової кількості інокуляту.

8. Оцінка техніко-економічних параметрів впровадження технології.

Оцінка нової технології проводиться з точки зору економічної доцільності її впровадження. При цьому розраховуються додаткові витрати на впровадження технології, економічний ефект та термін окупності. Через особливості застосованих у комунальній інфраструктурі процесів їх ефективність зазвичай визначається критеріями якості (наприклад, якість води, очищених стічних вод тощо). В такому випадку економічний ефект слід оцінювати, враховуючи можливість виникнення ризиків (методика їх розрахунку наведена в основному тексті дисертації).

Якщо на одному з вказаних вище етапів стає очевидною недоцільність використання біотехнологічних прийомів для підвищення ефективності технологічного процесу, роботи у даному напрямку потрібно зупинити.

ВИСНОВКИ

Комплексне дослідження дало змогу науково обґрунтувати та експериментально довести можливість використання прийомів біотехнології для інтенсифікації технологічних процесів, які застосовуються на об'єктах комунальної інфраструктури.

За результатами проведених досліджень зроблено наступні висновки.

1. Встановлено і експериментально підтверджено вплив біологічних процесів на видалення сполук заліза і мангану на швидких цеолітових фільтрах з води з достатньою карбонатною лужністю та визначено технологічні параметри роботи фільтрів.

2. Визначено, що у завантаженні працюючих швидких фільтрів знезалізнення серед мікроорганізмів, які беруть участь у процесах видалення з води сполук заліза та мангану, основним є мікроценоз з 10 родів залізобактерій. Встановлено кількісні співвідношення між цими організмами при різній якості вихідної води, зокрема для смт Хорошів чисельність мікроорганізмів становила (КУО/г завантаження): р. *Leptothrix* - 530-2070, р. *Sphaerotillus* - 150-720, р. *Metallogenium* - 240-370, інших – 3490-8070.

3. Отримано мутантні культури залізобактерій родів *Leptothrix* та *Sphaerotillus*, які у співвідношенні приблизно 1:1 забезпечували ефективність видалення мангану на рівні 98 %.

4. Визначено можливість інтенсифікації процесів знезалізнення і деманганації шляхом внесення у цеолітове завантаження швидких фільтрів інокулятів природних або селектованих культур мікроорганізмів родів *Leptothrix* і *Sphaerotillus* та їх сумішей. Відпрацьовано технологічні параметри цього процесу та фінішного знезараження води, запропоновано відповідні

технологічні схеми, їх апаратурну реалізацію та удосконалено конструкції фільтрів. Визначено, що при застосуванні біотехнології можна досягти ефективності очищення води за залізом та манганом: з природними культурами на рівні 94-99 % та 71-87 % відповідно; з мутантними культурами – 98-99 % та 94-97 % відповідно.

5. Встановлено, що у швидких фільтрах деамонізації одночасно з процесом нітрифікації відбувається і процес денітрифікації, причому перший з них в основному перебігає у верхній, а другий – спостерігається у нижній частинах фільтра. Експериментально визначено, що біологічним агентом нітрифікації виступають представники родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter* (чисельність 700-950 КУО/г), а денітрифікації - *Thiobacillus denitrificans* (чисельність 45-100 КУО/г). Границя переходу між зонами нітри- та денітрифікації визначалась за концентрацією кисню, яка у дослідженнях знаходилась на висоті 0,12-0,44 загальної висоти завантаження.

6. Розроблено стохастичну математичну модель впливу концентрації розчиненого кисню на перебіг процесів нітри- та денітрифікації і ефективність роботи фільтрів деамонізації. Здійснено її оптимізацію та створено розрахунковий алгоритм для визначення оптимальних параметрів аерації та кількісного співвідношення потрібних для інтенсифікації процесу деамонізації мікроорганізмів в інокуляті. Відповідна модель реалізована у вигляді програми мовою Swift 4.0, погрішність моделі не перевищує 6 %.

7. Експериментально доведено можливість інтенсифікації технології деамонізації підземних вод типового фізико-хімічного складу (рН 6,8-7,5, загальна лужність 4,5-6,5 ммоль/дм³, перманганатна окиснюваність 2,0-4,5 мг/дм³) шляхом внесення у фільтруюче завантаження інокулятів мікроорганізмів родів *Thiobacillus denitrificans*, *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, кількість яких розраховується за комп'ютерною програмою, та встановленням оптимальних параметрів роботи аератору. Розроблено відповідну технологічну схему та експериментально показано, що при її реалізації можна досягти скорочення терміну пуску фільтрів деамонізації в експлуатацію з 14 до 2 діб.

8. Вивчено умови розвитку різних груп мікроорганізмів, кількісно оцінено їх співвідношення та встановлено залежності від фракційного складу ТПВ для полігонів деяких населених пунктів України. Виявлено кореляційні залежності ($R=0,65-0,68$) та створено математичну модель для опису вказаних процесів і визначення оптимального складу мікроценозів. Модель реалізовано у вигляді комп'ютерної програми мовою Apple Swift 4.0

9. Запропоновано технологію інтенсифікації біодеструкції ТПВ шляхом створення близьких за складом до природних мікроценозів комплексних препаратів, прогнозування складу яких здійснюється на основі математичної моделі. Показано, що застосування трикомпонентного препарату, отриманого за цією технологією, забезпечувало збільшення ефективності деструкції у порівнянні з препаратом на основі монокультури роду *Bacillus* на $26,4 \pm 0,2$ %.

10. Розроблено методологію застосування біотехнології для інтенсифікації технологічних процесів у комунальній інфраструктурі населених

пунктів, яка дозволяє шляхом реалізації послідовних етапів суттєво підвищити ефективність процесів знезалізнення, деманганації, деамонізації у водопостачанні та біодеструкції органічних сполук на полігонах ТПВ. Оцінку даної методології здійснено на прикладі методу аеробної стабілізації осадів стічних вод.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кравченко О.В. Розробка методики ідентифікації культур мікроорганізмів, які здатні окислювати сполуки заліза та мангану у природних водах / О.В. Кравченко // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. Випуск 24. – Київ : КНУБА, 2014. – 296 с. – С. 140 – 145. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.).

2. Кравченко О.В. Роль мікроорганізмів при видаленні із води високих концентрацій заліза на фільтрах з цеолітовим завантаженням / О.В. Кравченко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. – 2015. – № 1 (69) – С. 58 – 65. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.).

3. Кравченко О.В. Дослідження біоценозів завантаження фільтрів знезалізнення та деманганації та методика заселення ними цеоліту / О.В. Кравченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/6 (77) – С. 39 – 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51056. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №793 від 04.07.2014 р.). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: CrossRef, Index Copernicus, American Chemical Society, ПІНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor. З листопада 2015 року входить до наукометричної бази даних Scopus.*

4. Кравченко О.В. Отримання високопродуктивних штамів мікроорганізмів для видалення із води сполук заліза та мангану / О.В. Кравченко // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. – 2015. - № 123. – С. 85 – 91. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.).

5. Кравченко О.В. Розробка методу інокуляції залізо- та манганредуючих організмів з оцінкою ефективності подальшого видалення цих забрудників / О.В. Кравченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. - № 59. – С. 70 – 76. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.).

6. Кравченко О.В. Дослідження співвідношення залізо- та манганоокислюючих бактерій у природних біоценозах та їх вплив на ефективність очищення води від цих елементів / О.В. Кравченко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. –

2015. – № 4 (72) – С. 310-320. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.).

7. Кравченко О.В. Визначення технологічних режимів промивки завантаження фільтрів знезалізнення та деманганації / О.В. Кравченко // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 4 – С. 180 – 186. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №747 від 13.07.2015 р.).

8. Kravchenko O. Role of Biological Processes during Manganese Removal from Underground Water / O. Kravchenko // «EUREKA: Physical Sciences and Engineering». – 2016. – № 1 – С. 61 – 66. (Країна Естонія, посилання на видання: <http://eu-jr.eu/engineering/index>). *Іноземне видання.*

9. Кравченко О.В. Оцінка ролі біологічних процесів у традиційних методах знезалізнення та деманганації води / О.В. Кравченко, О.С. Панченко, О.В. Кравченко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування – 2016. - № 841. – С. 20 – 25. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 06.03.2015р. №261). *Здобувачем здійснено розробку плану експерименту, підготовку пілотних установок та обробку результатів, формулювання висновків.*

10. Кравченко О.В. Вплив озону і перекису водню на інтенсифікацію біологічної та фізико-хімічної складових процесу знезалізнення та деманганації води / О.В. Кравченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» – 2016. - № 6 (110). – С. 7 – 14. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказів Міністерства освіти і науки України від: від 13.07.2015 р. № 747, від 07.10.2015 р. № 1021 і від 09.03.2016 р. №241). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Chemical Abstracts Plus (CASSI), OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Open Academic Journal Index, AcademicKeys, ResearchBib, Turkish Education Index, Eurasian Scientific Journal Index, Cosmos Impact Factor, Miar, WCOSJ, I2OR, Scholarsteer, SIS, IIJIF, InfoBase Index.*

11. Роль микроорганизмов в очистке воды от соединений железа и марганца в плотном слое сорбента-катализатора [Текст] / А. В. Кравченко, Н. Н. Чернова, Е. С. Панченко и др. // Химия и технология воды. — 2016. — Т. 38, № 5 (253). — С. 531-541. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від від 21.12.2015 р. № 1328). *Здобувачем проведено роботи з розробки плану експерименту, підготовки пілотної установки та обробки результатів та формулювання висновків.*

12. Кравченко О.В. Застосування окисників для інтенсифікації біологічної складової процесів знезалізнення і деманганації води / О.В. Кравченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» – 2016. - № 3. – С. 42 – 47. (фахове видання України з технічних наук

відповідно до наказів Міністерства освіти і науки України від: від 13.07.2015 р. № 747, від 07.10.2015 р. № 1021 і від 09.03.2016 р. № 241). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Chemical Abstracts Plus (CASSI), OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Open Academic Journal Index, AcademicKeys, ResearchBib, Turkish Education Index, Eurasian Scientific Journal Index, Cosmos Impact Factor, Miar, WCOSJ, I2OR, Scholarsteer, SIS, IJIF, InfoBase Index.*

13. Кравченко О.В. Біотехнологічні підходи для інтенсифікації видалення амонію при підготовці питної води/ О.В. Кравченко, О.С. Панченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2017. - № 3 (110). – С. 34 – 40. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказів Міністерства освіти і науки України від: від 13.07.2015 р. № 747, від 07.10.2015 р. № 1021 і від 09.03.2016 р. № 241). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Chemical Abstracts Plus (CASSI), OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Open Academic Journal Index, AcademicKeys, ResearchBib, Turkish Education Index, Eurasian Scientific Journal Index, Cosmos Impact Factor, Miar, WCOSJ, I2OR, Scholarsteer, SIS, IJIF, InfoBase Inde. Здобувачем розроблено план експерименту, пілотні установки, сформульовано основні висновки до роботи.*

14. Кравченко О.В. Оцінка ефективності застосування завантажень при біотехнологічно інтенсифікованому процесі знезалізнення та демангації води на швидких фільтрах / О.В. Кравченко, О.С. Панченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2017. – № 6 – С. 14 – 19. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.111985 (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказів Міністерства освіти і науки України від: від 13.07.2015 р. № 747, від 07.10.2015 р. № 1021 і від 09.03.2016 р. № 241). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Chemical Abstracts Plus (CASSI), OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Open Academic Journal Index, AcademicKeys, ResearchBib, Turkish Education Index, Eurasian Scientific Journal Index, Cosmos Impact Factor, Miar, WCOSJ, I2OR, Scholarsteer, SIS, IJIF, InfoBase Index. Здобувачем розроблено план експерименту, сформульовано основні висновки до роботи.*

15. Горобець С.В. Біоінформаційне виявлення продуцентів магнітних наночастинок серед залізо- та манганоокисних бактерій / С.В. Горобець, О.В. Кравченко, М.О. Булаєвська, О.С. Панченко // Innovative Biosystems and Bioengineering, 2018, vol. 2, no. 2, С. 27–35, doi: 10.20535/ibb.2018.2.2.124256. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 04.04.2018 р. № 326). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз : DOAJ; ROAD; CNKI Scholar; Public Knowledge Project Index; JournalTOCs; WCOSJ; Vifabio; EZB; Zeitschriftendatenbank; Polska Bibliografia Naukowa; Index Copernicus; Bielefeld*

Academic Search Engine; OpenAir; WorldCat. Здобувачем проведено роботи з визначення основних родів залізобактерій, проведено аналіз результатів, оцінено перспективи використання магнітомічених залізобактерій у технологіях очищення води.

16. Кравченко О.В. Біологічна нітрифікація-денітрифікація у процесі підготовки питної води: сучасний стан і основні біологічні агенти / О.В. Кравченко, О.С. Панченко, В.В. Мотроненко, Є. Смілянець // *Innovative Biosystems and Bioengineering*. 2018. vol. 2, no. 1, С. 64-70. DOI: 10.20535/ibb.2018.2.1.130346 (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 04.04.2018 р. № 326). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ; ROAD; CNKI Scholar; Public Knowledge Project Index; JournalTOCs; WCOSJ; Vifabio; EZB; Zeitschriftendatenbank; Polska Bibliografia Naukowa; Index. Здобувачем розроблено план експерименту, здійснено статистичну обробку експериментальних даних, сформовано математичну модель процесу та сформульовано висновки до роботи.*

17. Кравченко О.В., Галкін А.Ю., Панченко О.С. Вплив аерації на склад біоценозу та ефективність видалення нітрогеновмісних сполук на швидких фільтрах підготовки питної води // *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. – 2018. – № 3 – С. 15-22. DOI: 10.20535/1810-0546.2018.3.130461 (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказів Міністерства освіти і науки України від: від 13.07.2015 р. № 747, від 07.10.2015 р. № 1021 і від 09.03.2016 р. № 241). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Chemical Abstracts Plus (CASSI), OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Open Academic Journal Index, AcademicKeys, ResearchBib, Turkish Education Index, Eurasian Scientific Journal Index, Cosmos Impact Factor, Miar, WCOSJ, I2OR, Scholarsteer, SIS, IIJIF, InfoBase Index. Здобувачем розроблено план експерименту, здійснено обробку експериментальних даних, сумісно з Галкіним О.Ю. сформульовано висновки до роботи.*

18. Кравченко О.В., Кузьмінський Є.В., Панченко О.С. Методологічні підходи до біотехнології очищення питної води: методики виділення та ідентифікації залізо- та манганокиснюючих бактерій // «Стандартизація, сертифікація, якість» - 2018. № 2. – С. 89-93. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України №54 від 25.01.2013 р.). *Здобувачем запропоновано методику виділення та ідентифікації залізобактерій та сформульовано основні висновки до роботи в частині її практичного застосування.*

19. Kravchenko O., Panchenko O. Isolation of pure cultures iron- and manganese-oxidizing bacteria from rapid filters // *Biotechnologia Acta*. – 2018. – Т. 11, № 2 – С. 78-82. DOI: 10.15407/biotech11.03.078. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017р. №1714). *Журнал входить до міжнародних наукометричних баз: CrossRef, DOAJ, CAS,*

OAJI, JournalTOCs, Index Copernicus, SIS, Ciberleninka, ResearchBib, WorldCat, ProQuest, EBSCO, Citefactor, e-LIBRARY, Ciberleninka, РБД "Джерело". Здобувачем запропоновано основні теоретичні засади роботи, розроблено план експерименту, сформульовано основні висновки.

20. Кравченко О.В., Сатін І.В., Шевченко Л.В., Панченко О.С. Вплив морфологічного складу твердих побутових відходів на видову структуру мікробіоценозів, що формуються в тілах полігонів// Innovative Biosystems and Bioengineering, 2018, vol. 2, no. 3, С. 203-209, doi: 10.20535/ibb.2018.2.3.146100. (фахове видання України з технічних наук відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 04.04.2018 р. № 326). Журнал входить до міжнародних баз : DOAJ; ROAD; CNKI Scholar; Public Knowledge Project Index; JournalTOCs; WCOSJ; Vifabio; EZB; Zeitschriftendatenbank; Polska Bibliografia Naukowa; Index Copernicus; Bielefeld Academic Search Engine; OpenAir; WorldCat. Здобувачем проведено роботи з вивчення залежності між фракційним складом ТПВ та особливостями розвитку різних груп мікроорганізмів у тілі полігонів.

21. Патент на корисну модель 125641 UA, МПК (2006.01) C02F 1/64. Спосіб знезалізнення та деманганації води / Кравченко О.В., Панченко О.С.; Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства». – № у 2018 02369; Заявл. 12.03.2018; Опубл. 10.05.2018, Бюл. №9, 2018р. Здобувачем було розроблено основну ідею та ключові засади, сплановано та підготовлено плани з апробації.

22. Кравченко О. В. Використання мікроорганізмів як перспективний спосіб знезалізнення підземних вод / О. В. Кравченко, О. В. Гуцол, І.Р. Клечак, О. С. Панченко // «Біотехнологія ХХІ століття» : Тези доповідей ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції / Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2015. – С. 149. Здобувачем сформульовано основні теоретичні засади роботи, проведено оцінку можливості внесення мікроорганізмів для інтенсифікації роботи швидких фільтрів різних конструкцій, сформульовано основні висновки.

23. Кравченко О.В. Вплив окисників на протікання процесів фільтрування підземної води із значним вмістом сполук заліза / О.В. Кравченко, О. С. Панченко // Збірник доповідей Міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2015», м. Іллічівськ, 8-12 черв. 2015. - С. 38-44. Здобувачем запропоновано ідею, підібрано дози реагентів, проведено аналіз результатів експериментів, сформульовано основні висновки.

24. Кравченко О.В. Дослідження видового складу мікроорганізмів, присутніх у завантаженні фільтру для деманганації води / О.В. Кравченко, О. С. Панченко, О. В. Гуцол // Збірник доповідей Міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2015», м. Іллічівськ, 8-12 черв. 2015. - С. 76-79. Здобувачем запропоновано засади створення методики видалення і класифікації мікроорганізмів з

фільтрів деманганації, прийнято участь в обробці отриманих даних, сформульовано основні висновки.

25. Кравченко А.В. Оценка физико-химических и биологических процессов при обезжелезивании и демангации воды на фильтрах с цеолитовой загрузкой / А. В. Кравченко, Е.С. Панченко // Збірник доповідей Міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2017», м. Чорноморськ, 12-16 черв. 2017. - С. 76-81. *Здобувачем розроблено план експерименту та сформульовано основні висновки.*

26. Кравченко О.В. Сучасні технології видалення амонію з питної води / О.В. Кравченко, О.С. Панченко // Збірник доповідей Міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2017», м. Чорноморськ, 12-16 черв. 2017. - С. 82-85. *Здобувачем розроблено план експерименту та сформульовано основні висновки роботи.*

27. Гуцол О.В. Озонування з подальшим фільтруванням на цеолітових фільтрах як спосіб видалення заліза і марганцю з підземних вод / О. В. Гуцол, О.В. Кравченко, О.С. Панченко // «Біотехнологія ХХІ століття»: Тези доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції / Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – Київ, 21 квітня 2017. – с 112. *Здобувачем запропоновано ідею роботи та підібрано реагенти для інтенсифікації та діапазони їх доз.*

28. Кравченко О.В. Розробка ефективної біотехнології для видалення азотвмісних речовин з питної води / О.В. Кравченко, О.С. Панченко, Є.Я. Смілянець // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Природа для води», м. Київ, 22 березня 2018. - С. 146-147. *Здобувачем запропоновано ідею роботи та відповідну лабораторну установку, сформульовано основні висновки.*

29. Хоружий В. П. Навчальний посібник: «Експлуатація систем водопостачання та водовідведення / В. П. Хоружий, О. В. Кравченко. – Київ: КНУБА, 2018. – 203 с. – (КНУБА). *Здобувачем підготовлено основну частину розділів, які стосуються питань знезалізнення та деманганації води.*

АНОТАЦІЯ

Кравченко О.В. Біотехнологічні засади підвищення енергоресурсоефективності та екологічної безпеки процесів на об'єктах комунальної інфраструктури. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2019.

Представлені науково обґрунтовані рішення з біотехнологічної інтенсифікації процесів, що використовуються у комунальній інфраструктурі населених пунктів. Розроблено біотехнологію видалення сполук заліза та мангану з підземних вод на швидких фільтрах з цеолітовим завантаженням при внесенні культур мікроорганізмів родів *Leptothrix* і *Sphaerotillus*. Реалізація біотехнології дозволяє досягти ефективності очищення води за залізом та

манганом: з природними культурами - 94-99 % та 71-87 %; з селектованими - 98-99 % та 94-97 % відповідно. Розроблено технологію інтенсифікації процесу деамонізації у біофільтрах шляхом внесення у фільтруюче завантаження попередньо розрахованої кількості культур нітри- та денітрифікаторів, що дозволяє скоротити підготовчий режим роботи фільтра з 18 до 2 діб. Розроблено технологію одержання близьких за своїм складом до природних мікроценозів препаратів, використання яких збільшує ефективність біодеструкції на $26,4 \pm 0,2$ у порівнянні з традиційними.

Ключові слова: біотехнологія, знезалізнення, деманганації, деамонізація, деструкція ТПВ, математична модель, ефективність.

АННОТАЦИЯ

Кравченко А.В. Биотехнологические основы повышения энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов на объектах коммунальной инфраструктуры. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 03.00.20 - биотехнология. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2019.

В диссертации представлены результаты научно обоснованных технологических решений биотехнологической интенсификации процессов, которые широко используются в коммунальной инфраструктуре населенных пунктов. Разработана биотехнология удаления соединений железа и марганца путем внесения микроорганизмов родов *Leptothrix* и *Sphaerotillus*. Реализация биотехнологии позволяет достичь эффективности очистки воды от желез и марганца: с природными культурами - 94-99% и 71-87%; с селективными - 98-99% и 94-97% соответственно. Разработана технология интенсификации деамонизации в биофильтрах путем внесения в фильтрующую загрузку предварительно рассчитанного количества культур нитри- и денитрификатор, что позволяет сократить время пуска фильтра с 18 до 2 суток. Предложена технология получения близких по составу к естественным микроценозам препаратов, повышающих эффективность биодеструкции ТБО на $26,4 \pm 0,2$ по сравнению с традиционными.

Ключевые слова: биотехнология, обезжелезивание, деманганация, деаммонизация, деструкция ТБО, математическая модель, эффективность.

SUMMARY

Kravchenko O.V. Biotechnological bases to improve energetic and resource effectiveness and environmental safety of municipal infrastructure processes. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 03.00.20 - biotechnology. - National Technical University of

Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to scientific substantiation of new energy and resource efficient and ecological biotechnologies for intensification of processes of preparation of drinking water and utilization of solid household waste in municipal infrastructure objects, containing removing iron, manganese and nitrogen compounds from water as well as intensification for biodestruction of organic compounds in solid wastes.

In the study of the work of rapid filters on the water intake of the village of Khoroshiv, results were obtained that showed the iron / oxygen ratio to be at level of 0.12 - 0.25, which is according to existing ideas not enough to provide deep treatment, that was obtained practically. This lead us to idea of biotechnological process to take place. To confirm the above assumption, experiments were carried out on filtration of water with an iron concentration of $13,3 \pm 0,8 \text{ mg / dm}^3$ at a different filtration rate and in the presence of bacteria in the filter material. The results of additional experiments showed that usage of oxygen (which allowed biological growth) lead to deeper treatment than in case of hypochlorite usage. That is, the results obtained not only confirmed the role of microorganisms in the process of non-irritation / demaganization, but also showed the possibility of practical application of biotechnology methods to improve the efficiency of water purification from iron and manganese.

For the thorough examination of the biological agent from the filtering material of the various filters, 10 cultures of iron and manganese oxidizing microorganisms were isolated. The evaluation of the morphology of the cultures obtained, according to the scheme, allowed them to be classified as *Siderocapsa*, *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, *Galionella*, *Metallogenium*, *Hyphomicrobium*. The data of following experiments showed a predominant role in the processes of water disinfection of microorganisms of *Leptothrix*, *Sphaerotillus*, *Metallogenium* and *Siderocapsa*. Increasing the activity of a biological agent can be achieved by creating selective cultures of *Leptotrix* and *Sphaerotilus*, that can contribute to a deeper removal of manganese from water (up to 98% for Mn).

To implement the proposed schemes a number of technological tasks were solved, including: to develop effective methods of transfer of inoculum to the loading of filters, to select the most suitable filtering loading for the specified purposes, to determine the optimum parameters and regimes of filtering and washing of the filtering layer. Based on the results of the research carried out for the implementation of biotechnology for disinfection and demagnetization on rapid filters, two technological schemes were developed using natural or selected microorganisms cultures.

The study of the possibility of intensifying the deamonization of underground water technology was carried out by conducting a complex of pilot studies on the water of the artesian well in the city of Khmelnytsky. The experimental plant included filter with an aerator, loaded with a special filter material, on which the microorganisms are effectively fixed and retained.

The results of the experiments allowed to reveal important dependencies. Since the concentration of dissolved oxygen at the filter inlet has an opposite effect on the flow of processes, it was appropriate to investigate their regularities at different values of this indicator. The results of experiments showed that when the oxygen supply was reduced from 8 to 5.5 mg / dm³, the concentration of ammonium in the filtered water was in the range of 0.11-0.12 mg / dm³, nitrites - 0.27-0.28 mg / dm³, and nitrates gradually decreased from 11.0 to 2.4 mg / dm³, that is, at high concentrations of oxygen due to nitrification, a significant amount of nitrates was produced, and as the oxygen content decreased due to denitrification, the decomposition of nitrates and their concentration declined.

The mathematical model was prepared to describe this process and the resulting program was realized in Swift 4.0. The results of the comparison of the experimental data obtained with the forecast by model showed that the prediction error of the model does not exceed 6.0%, that is, it is much smaller than the allowable value for engineering calculations. Based on the results of the research and the developed model, a technology for intensifying the biofiltration process for ammonia removal was developed to decrease time of filters preparation. The use of technology has allowed to shorten the start time of the filter for use from 18 to 2 days.

The interconnection between the morphological composition of the solid waste and the biocenoses formed therein was investigated by sorting several samples that arrive at the polygons mm. Kiev and Khmelnytsky. The correlation with coefficient $R=0,65-0,68$ was established and mathematical model to describe the process was obtained. An assessment of the adequacy of the developed model was carried out by comparing the predicted data obtained from the model with the experimental data for the map of the polygon in Chernivtsi with an approximate time of stay of the SHW for 5 years. Comparison of the predicted composition of the biocenosis with the actual allocated showed that the difference between the predicted and actual data on the number of bacteria in the biocenose was 12.5%, and according to the morphological composition - did not exceed 15%, which confirmed the adequacy of the developed model.

An assessment of the effectiveness of the proposed technology was carried out by laboratory on samples of MSW in Kyiv using a traditional *Bacillus*-based prepare and mixed one, the composition of which was determined by simulation. According to the data obtained, the use of a mixture accelerated the biodestruction and rate of subsidence of the sample (by $26,4 \pm 0,2\%$).

Key words: biotechnology, iron removal, demaganization, deamonization, iron oxide, solid wastes biodegradation, mathematic modelling, effectiveness.